

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического приборостроения

Р. Г. Мирзоев, А. Ф. Харченко

ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2000

УДК 330.1
ББК 65.050.9
М63

Мирзоев Р. Г., Харченко А. Ф.

М63 Основные процедуры системных исследований: Учеб. пособие / СПбГУАП. СПб., 2000. 180 с.: ил.

Рассматриваются методологические особенности процесса и процедур системных исследований в менеджменте и маркетинге. Особое внимание при этом уделяется процедурам формирования целей, методам и средствам их реализации. Подробно излагаются подходы и методы моделирования, по результатам которых производится выбор и упорядочение альтернатив при принятии решений в ситуациях полной и неполной информации.

Предлагаемое учебное пособие входит в комплект учебно-методической литературы по системным исследованиям кафедры менеджмента и маркетинга СПбГУАП и предназначено для преподавателей, аспирантов и студентов экономических факультетов вузов, а также сотрудников, интересующихся проблемами системных исследований.

Рецензенты:

кафедра экономической кибернетики и экономико-математических методов моделирования СПбГУЭФ; доктор экономических и философских наук профессор *А. И. Субетто*

Утверждено

редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

© СПбГУАП, 2000

© Р. Г. Мирзоев,
А. Ф. Харченко, 2000

ПРЕДИСЛОВИЕ

Повышением эффективности интеллектуально-производственной, в том числе управленческой деятельности является путь внедрения разнообразных достижений научно-технического прогресса в настоящее время и в обозримом будущем – всемерное повышение наукоемкости или информационной емкости результатов (в виде соответствующей производственной, проектно-конструкторской, научно-исследовательской и т. д.) деятельности и управление ею. В то же время на принятие управленческого решения о выделении всегда ограниченных ресурсов, одинаковых средств для поддержки тех или иных направлений исследований, создания наукоемких изделий, работ, проектов, программ и т. д., как правило, значительное влияние оказывает человеческий фактор в виде соответствующего интеллектуально-волевого комплекса мнений (или поведения), как нужно управлять, например, разнообразными социально-экономическими, хозяйственными системами и что необходимо сделать для достижения тех целей, ради которых они созданы или создаются.

И хотя такой механизм управления исторически оправдан, он зачастую приводит к «деформациям» и тупиковым решениям в развитии систем науки, экономики, техники, технологии и т. д. Для уменьшения вероятности подобных негативных явлений во второй половине текущего века в мировой практике управления созданы основанные на системном подходе различные комплексы системных дисциплин информационной поддержки решений. К их числу относится и такое направление системных исследований (СИ) как «Принятие решений», представляющее собой методологию формализации процесса принятия решений, особенно при наличии риска и неопределенностей, использование которой оказывает существенную помощь при решении многих практических задач.

В настоящее время методология формализованного принятия решения получила общемировое признание в самых различных областях науки, политики, экономики, техники, искусства, философии, а также системно-практической (например, менеджмент, маркетинг) деятельности. Причем сфера этих приложений стремительно расширяется, и поэтому естественна потребность привития соответствующих навыков по СИ, методам формализованных процедур принятия решений будущим инженерам и особенно инженерам-экономистам – лицам, принимающим решение (ЛПР).

В данном издании рассматриваются основные процедуры СИ, выполнение которых в определенной последовательности приводит к

решению или подготовке соответствующего управленческого маркетингового решения по функционированию или развитию фирмы, предприятия. Процесс маркетингового исследования считается завершенным после интерпретации подготовительного решения, а при его принятии – после его перевода в директивы и рекомендации для реализации этого решения.

Обобщенная схема (алгоритм) процесса любого СИ состоит из двенадцати взаимосвязанных этапов (рис. 1): 1 – формирование и предварительная оценка полезности исходной информации; 2 – выявление проблемы; 3 – формирование определения; 4 – формирование и анализ проблемной ситуации; 5 – формулировка, постановка конкретной задачи исследования; 6 – разработка моделей решения задачи; 7 – разработка (выбор) формального, желательного математического метода решения задачи и реализующего его алгоритма; 8 – разработка альтернатив; 9 – оценка альтернатив (их реализуемости и последствий); 10 – поиск, определение, выбор альтернативы решения; 11 – интерпретация и оценка результатов выбора (решения); 12 – разработка рекомендаций по реализации решения.

К сожалению, в учебной и специализированной литературе по формализованным методам принятия управленческих решений отсутствуют систематизированные изложения современной концепции СИ, их специфики в условиях неопределенности, наличия риска и т. д. Отчасти, по мнению авторов, эти недостатки компенсируются данным изданием, в котором использованы методологические разработки и опыт по формированию методологических основ инструментария информатизации (разработка математических моделей и их реализация на РС) СИ в экономике для решения организационно-экономических, управленческих задач, накопленный мировой и особенно отечественной практикой, в том числе сотрудниками Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения и Санкт-Петербургского университета экономики и финансов. В частности, гл. VI написана совместно с аспирантом В. М. Барболиным.

Предлагаемое издание является результатом выполнения работ по теме «Формирование концепции информатизации научно-экономических исследований» и предназначено как для студентов экономических, управленческих специальностей, для аспирантов, изучающих организационно-экономические дисциплины, так и для практических работников финансово-экономических специальностей различных организаций и предприятий России.

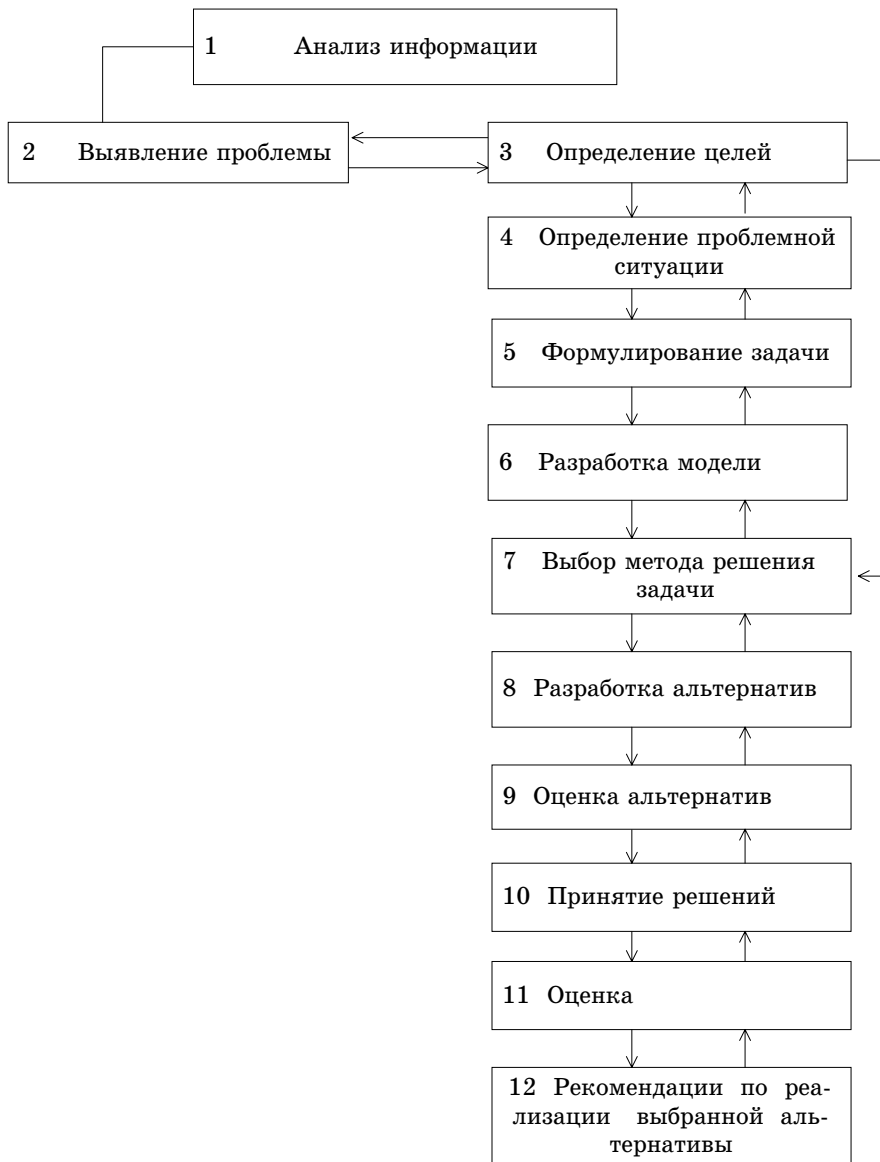


Рис. 1. Этапы системного исследования

ЦЕЛЕПОЛАГАНИЕ

Как известно, целенаправленность есть главная черта любой человеческой деятельности. Поэтому и предпринимательской деятельности, и менеджменту, и организации производства как специфическим видам социальной деятельности человека присуще формирование целей деятельности или поведения. При этом определим *цель как заранее мыслимый результат, находящийся в пространстве шкалы от мечты до задачи*: чем конкретнее имеется представление о средствах достижения целей, тем цель в пространстве шкалы «мечта – задача» удаляется от мечты и приближается к задаче.

Формирование и выбор целей является исходным, начальным пунктом аналитических процессов принятия решений в сфере бизнеса (например, для менеджмента нет более важной идеи, чем цель). Искусство постановки цели – это искусство управления. Без целей оценка трудовой деятельности сотрудников имеет зыбкую основу.

Цель выражает исходный пункт процесса управления. Всякий трудовой процесс с участием человека предполагает наличие цели. Достижение определенной цели является содержанием и мерой эффективности деятельности вообще и управления в частности. *Цель управления* – это относящееся к будущему, предполагаемое действующим субъектом управления – ЛПР – желаемое состояние объекта управления и его отдельных параметров. Цели в своей основе объективны. В них отражаются объективные закономерности, требования законов экономического, экологического, социального, демографического и естественно-технического развития, определяющего, в конечном счете, цели и намерения людей, направления и формы их деятельности. Вместе с тем цели всегда являются продуктом сознания и формируются в процессе совместной деятельности людей. Цель заставляет человека думать. Люди делают что-то не потому, что думают, а думают потому, что должны что-то делать для достижения целей. В целях диалектически сочетается объективное и субъективное. Необходимо твердо запомнить: *первейшая цель – это определение целей, что является центральным этапом методологии СИ в экономике, организации производства и менеджменте.*

Системный подход требует формирования системы целей управления на основе глубокого анализа состояния и функциональных возможностей объекта управления. Характер, структура и функции органов управления определяются с учетом целей, поставленных перед объектом управления. Множественность целей управления вызывает необходимость их определенной классификации по содержанию, временному горизонту и по уровням управления.

Естественно, что для системного специалиста (менеджера) важно четко представлять, что требуется от системы, какие результаты желательны, т. е. необходимо иметь определенный набор требований к системе или, другими словами, иметь четко сформированную цель деятельности. Особенно важную роль этап целеполагания играет при решении сложных социально-экономических и организационно-технических проблем (например, при организационных и экономических преобразованиях, проводимых в экономической сфере на разных уровнях – народнохозяйственном, отраслевом, региональном, на предприятиях). Уже на первых фазах выявления проблемы необходимо иметь представление о тех целях, которые предполагается достичь в результате проведения реорганизации.

Очевидно, что на этой стадии СИ цели носят еще аморфный, качественный характер, например «Повысить эффективность деятельности предприятия» или «Улучшить процесс управления подразделением». Естественно, что такое декларативное представление цели дает мало конструктивных рекомендаций по ее достижению. Здесь не ясны не только способы достижения цели, но также не ясно, что считать повышением эффективности или улучшением процесса управления, т. е. в этом случае является неопределенной сама процедура изменения получаемого результата: какие управляемые и неуправляемые факторы и каким образом влияют на достижение цели, как их измерять и т. д.

Поэтому на этапе уяснения проблемы одновременно с анализом полученной информации о системе и внешней среде проводится уточнение глобальной (генеральной) цели решения проблемы. Рассматривается, что можно улучшить, до какой степени и каких результатов можно достичь. Необходимо сделать цель реалистичной, направить с ее помощью деятельность на получение определенного полезного результата. Важное значение при этом имеет возможность предпочтения или измеримость целей, что на практике реализуется следующим образом.

Пусть X – множество систем (альтернатив), имеющих целевое назначение C . Лицо, принимающее решение о предпочтительности

систем на X (в качестве ЛПР, в зависимости от конкретной ситуации, может выступать менеджер, проектировщик, заказчик, пользователь и т. д.), анализируя соответствие систем $X', X'' \in X$ цели Π , может установить одно из следующих соотношений:

1) $X' \overset{\Pi}{>} X''$, где символ $\overset{\Pi}{>}$ означает: предпочтительнее по отношению к цели Π ;

2) $X' \overset{\Pi}{<} X''$, где символ $\overset{\Pi}{<}$ означает: менее предпочтительна по отношению к цели Π ;

3) $X' \overset{\Pi}{\sim} X''$, где символ $\overset{\Pi}{\sim}$ означает: эквивалентна по отношению к цели Π ;

4) $X' \overset{\Pi}{\neq} X''$, где символ $\overset{\Pi}{\neq}$ означает: несравнима по отношению к цели Π .

Несравнимость систем имеет место всякий раз, когда ЛПР не может установить для них ни одного из перечисленных отношений. Системы X' и X'' могут оказаться несравнимыми между собой, во-первых, из-за невозможности для ЛПР установить отношения предпочтительности, в справедливости которых он мог бы быть уверен, и, во-вторых, из-за конкретных особенностей X' и X'' , по мнению ЛПР, лишаящих смысла процедуру сравнения.

На рис. 2 показаны два графа, вершины которых – суть системы

из множества X , а ребра – отношения предпочтительности $\overset{\Pi}{>}$ и $\overset{\Pi}{\sim}$, устанавливаемые ЛПР на X . Графу на рис. 2, а соответствует из-

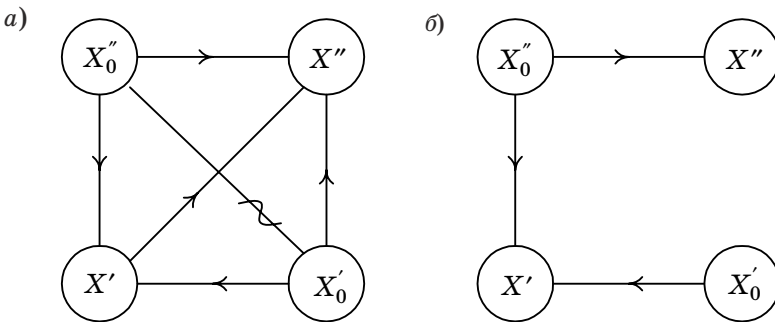


Рис. 2. Граф измеримой (а) и частично измеримой (б) цели системы

меримая цель Π , и он является полным – каждая пара вершин этого графа смежная. Граф на рис. 2, б построен для частично измеримой цели. Отношения предпочтительности установлены в нем не для всех пар вершин. Анализируя оба графа, нетрудно установить, что в обоих случаях $X_0 = \{X'_0, X''_0\}$. Однако для первого графа $X_0 \sim X''_0$, а для второй системы X'_0 и X''_0 несравнимы.

Таким образом, если Π – измеримая цель, то для определения лучшей системы на множестве X достаточно найти любую систему $x_0 \in X_0$. Это можно сделать, если предварительно построить на X граф, аналогичный приведенному на рис. 2, а.

Если в X содержится m систем, такой граф, будучи полным, имеет C_m^2 ребер. Следовательно, уже при $m = 10$ ЛПП для отыскания X_0 придется установить отношения предпочтительности между $C_{10}^2 = 45$ парами систем, что делает процедуру отыскания X_0 чрезмерно громоздкой и трудоемкой. Другой, более перспективный путь нахождения X_0 связан с введением понятия количественно измеримой цели.

Цель Π количественно измерима на множестве сравниваемых систем (альтернатив) X , если на X существует вещественная функция $f(x)$, сохраняющая упорядочение.

Функция $f(x)$ сохраняет упорядочение, если для любых $x', x'' \in X$

$$x' > x'' \Leftrightarrow f(x') > f(x''),$$

где символ \Leftrightarrow означает: тогда и только тогда, когда.

Если измеримые цели позволяют выделить лучшую систему X_0 только непосредственно анализом установленных на множестве отношений предпочтительности, то для количественно измеримых целей можно предложить и другой подход, при котором x_0 ищется как система, обеспечивающая значение

$$f(x_0) = \max_{x \in X} \{f(x)\}.$$

Такой подход, в отличие от рассмотренного ранее, не требует конечности множества X и сводит процесс отыскания X_0 к решению чисто формальной задачи отыскания экстремума вещественной функции $f(x)$.

Возможность измеримости целей существенно упрощает решение практических задач СИ и облегчает обобщение результатов исследо-

вания процессов целеобразования, проводимых философами, психологами, кибернетиками, системщиками и т. д. Так, наблюдение и изучение процессов обоснования и структуризации целей в конкретных условиях позволили сформулировать ряд *общих закономерностей целеформирования*, которые широко используются в практике СИ в экономике и организации производства. К их числу относятся следующие.

1. *Зависимость представления о цели системы и формулировки ее от стадии познания объекта (процесса).*

Формулируя цель, необходимо стремиться отразить в формулировке или в способе представления цели ее активную роль в познании и в то же время сделать ее реалистичной, направить с ее помощью деятельность системы на получение определенного полезного результата.

При этом формулировка цели и представление о цели зависят от стадии познания объекта СИ, и в процессе развития представлений о нем цель может переформулироваться. При формулировании или пересмотре цели коллектив, формулирующий и выполняющий ее, должен определить, в каком смысле на данном этапе рассмотрения объекта СИ и развития наших представлений о нем употребляется понятие «цель», к какой точке условной шкалы «идеальное устремление в будущее – конечный результат деятельности» находится ближе принимаемая формулировка цели. По мере развития СИ, познания объекта СИ эта точка в условной шкале может сдвигаться в ту или иную сторону, что и обуславливает необходимость переформулирования цели объекта СИ.

2. *Зависимость цели от внешних и внутренних факторов.*

При анализе причин возникновения и формулирования целей необходимо учитывать, что на цель влияют как внешние (потребности, мотивы, программы), так и внутренние (потребности, мотивы, программы самой системы, ее элементов, исполнителей цели) по отношению к системе факторы. При этом последние так же объективно влияют на процесс целеобразования, как и внешние. Внешние противоречия являются источниками формирования целей систем, тогда как внутренние противоречия систем являются источником развития, переформирования целей и функций систем (см. п. 1).

Цели системы могут возникать на основе взаимодействия (в большинстве случаев противоречий) как между внешними и внутренними факторами, так и между внутренними факторами, существовавшими ранее и вновь возникающими в находящейся в постоянном самодвижении целостности системы.

Эта закономерность характеризует очень важное отличие организационных, «открытых», развивающихся систем от технических систем, отображаемых обычно «замкнутыми» или «закрытыми» моделями. Теория управления последними оперирует обычно понятием «цель» как внешним по отношению к системе, а в «открытых», развивающихся системах цели не задаются извне, а формируются внутри системы на основе рассматриваемой закономерности.

3. Возможность сведения задачи формулирования обобщающей (общей, глобальной) цели к задаче структуризации цели.

Анализ процессов формулирования обобщающей, глобальной цели в сложных системах показывает, что эта цель возникает в сознании руководителя или коллектива не как единичное понятие, а как некоторая, достаточно «размытая», область.

Исследования психологов показывают, что цель на любом уровне управления вначале возникает в виде некоторого «образа» цели или «размытой» области цели. При этом достичь одинакового понимания этой обобщающей цели всеми исполнителями часто принципиально невозможно без ее детализации в виде упорядоченного (в структуре) или неупорядоченного набора одновременно возникающих взаимосвязанных подцелей, которые делают ее понятной и более конкретной для разных исполнителей. Таким образом, задача формулирования обобщающей цели в сложных системах не только может, но и должна быть сведена к задаче структуризации или декомпозиции цели. Структура, коллективно формируемая, помогает достичь одинакового понимания общей цели всеми исполнителями.

Следующие закономерности развивают рассмотренные выше закономерности применительно к структурам целей.

4. Зависимость способа представления структуры целей от стадии познания объекта или процесса.

Цели могут представляться в виде декомпозиции обобщающей цели во времени (сетевых структур) и в виде декомпозиции в пространстве (матричных и иерархических структур) как древовидных (типа «дерева»), так и со «слабыми» связями.

На начальных этапах СИ удобнее применять декомпозицию в пространстве, расчленение обобщающей неопределенной цели на более понятные. При этом матричное представление позволяет выявить существенные для системы подцели на пересечении двух или нескольких признаков структуризации. Возникновение «слабых» иерархий можно объяснить тем, что цели вышележащих уровней иерархии сформулированы слишком «близко» к «идеальным устремлениям в будущее», а представление исполнителей о целях-зада-

чах не может обеспечить эти устремления. Представление развернутой последовательности подцелей в виде сетевой модели требует хорошего знания объекта исследования. Иногда сетевая модель может быть сформирована не сразу, а последующие цели могут выдвигаться по мере достижения предыдущих, т. е. пространство между обобщающей целью и начальным, исходным пониманием первой подцели будет заполняться как бы постепенно.

Представление развернутой последовательности подцелей в виде сетевой модели [10] может быть использовано и как средство управления, когда руководитель хорошо представляет себе конечную цель и ее декомпозицию во времени, но не уверен, что конечную цель сразу поймут исполнители. Тогда он может выдвигать перед ними подцели постепенно, по мере достижения предыдущей. При этом перспективным представляется развертывание во времени иерархических структур, т. е. сочетание декомпозиции цели в пространстве и во времени.

5. *Проявление в структуре целей закономерности целостности.*

В иерархической структуре целей (как в любой иерархической структуре) закономерность целостности проявляется на каждом уровне иерархии. Применительно к структуре целей это означает, что достижение целей вышележащего уровня не может быть полностью обеспечено достижением подцелей, хотя и зависит от них, и что потребности, мотивы, программы, влияющие на формулирование целей (как внешние, так и внутренние), нужно исследовать на каждом уровне иерархии. Таким образом, эффект целеобразования сохраняется на каждом уровне иерархии, но при этом «большая» неопределенность как бы разделяется на более «мелкие», и задача СИ потребностей, мотивов, программ верхнего уровня (уровня обобщающей подцели) тоже как бы распадается на подзадачи СИ потребностей, мотивов, программ на нижележащих уровнях, что становится более выполнимым.

При формировании системы целей функционирования и развития данной системы необходимо руководствоваться принципами интенсивного развития, ускорения прогресса, повышения эффективности в условиях жестких ограничений по ресурсам.

Используя вышеприведенные представления об «измеримости» целей и закономерностях их формирования, можно переходить к построению *графа целей*, тождественного графу операций, обеспечивающих достижение генеральной цели функционирования и развития системы. На рис. 3 изображен *m*-уровневый граф целей и задач. Цели любого нижнего уровня могут рассматриваться как за-

дачи, решение которых приводит к достижению целей верхнего уровня. Так, например, цель z_1^2 является задачей по отношению к целям z_1^1 и z_2^1 .

В графе $G = (z, r)$ выделяется кортеж

$$z = \{Z^0, z^1, \dots, z^{m-1}\},$$

состоящий из множества целей различных рангов: Z^0 – генеральная цель системы; z^i – множество целей i -го ранга или $(m-1)$ i -го уровня.

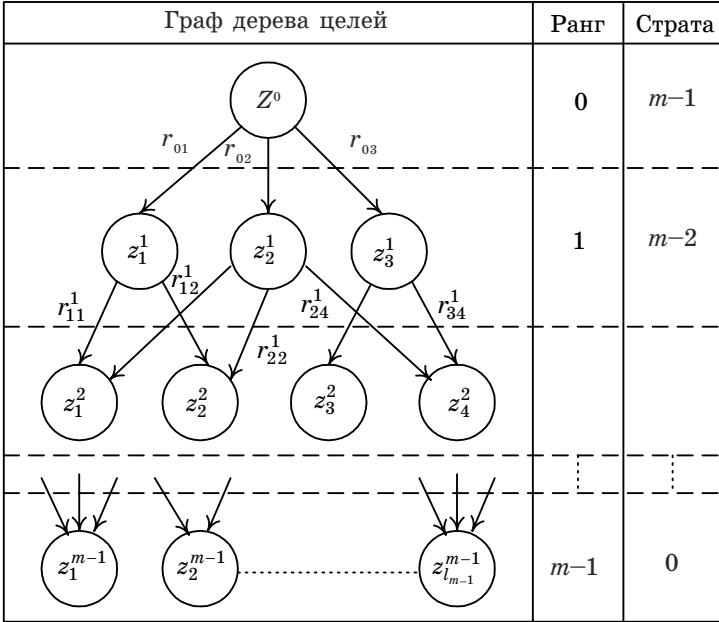


Рис. 3. Граф системы целей и задач системы

Множество дуг графа

$$\underline{\mathbf{R}} = \{r_{jv}^i\},$$

где $0 \leq i \leq m-2$; $0 \leq i \leq l_i$; $1 \leq v \leq l_{i+1}$ являются отношениями условий достижения целей верхнего уровня. В обозначении дуг r_{jv}^i верхний индекс i указывает ранг цели, из которой выходит дуга. Первый нижний индекс j – это номер вершины цели i -го ранга, из которой выходит дуга, и v – номер вершины $(i+1)$ -го ранга, в которую входит дуга.

Граф целей и задач (см. рис. 3) представляет собой дерево с корнем Z^0 только на подмножестве вершин 1-го ранга. Ниже связи между целями соседних рангов характеризуются связями перекрестными, что указывает на взаимосвязь задач $(i+1)$ -го ранга для достижения целей i -го ранга. В связи с этим обстоятельством дуги r_{jv}^i могут характеризовать отношение значимости (вклада, важности) решения v -й цели i -го ранга. В этом случае дугам r_{jv}^i можно поставить в соответствие коэффициенты относительной важности (КОВ) q_{jv}^i , или веса:

$$0 \leq q_{jv}^i \leq 1,$$

при этом

$$\sum_{v=1}^{l_{i+1}} q_{jv}^i = 1,$$

т. е. сумма весов всех дуг, исходящих из любой вершины z_j^i (любой j -й вершины i -го ранга), равна единице.

Сформированный граф целей возможно превратить в *дерево целей* (ДЦ), для чего необходимо произвести соответствующую перегруппировку с учетом весов q_{jv}^1 , определяемых экспертным путем КОВ целей.

Предположим, что весовой коэффициент q_{02} цели z_2^1 несущественен и принято решение об исключении z_2^1 из систем целей. Тогда граф целей (см. рис. 3) превращается в дерево (рис. 4). На рис. 4 обозначение z_3^1 заменено на z_2^1 и, соответственно, изменены другие индексы.

Пусть, например, рассматривается система управления эффективностью производственно-коммерческой деятельности авиапредприятия. Тогда может быть построено следующее ДЦ.

Z^0 — полное, своевременное и качественное удовлетворение потребностей народного хозяйства и населения в воздушных перевозках при минимальных затратах общественного труда и энергетических ресурсов.

Цели 1-го уровня:

z_1^1 — обеспечение эффективности функционирования производства предприятия;

z_2^1 — обеспечение эффективности развития предприятия.

Цели 2-го уровня:

z_{11}^2 – обеспечение выполнения производственной программы;

z_{12}^2 – обеспечение качества производства;

z_{21}^2 – обеспечение технического развития производства и охраны окружающей среды;

z_{22}^2 – обеспечение социального развития коллектива.

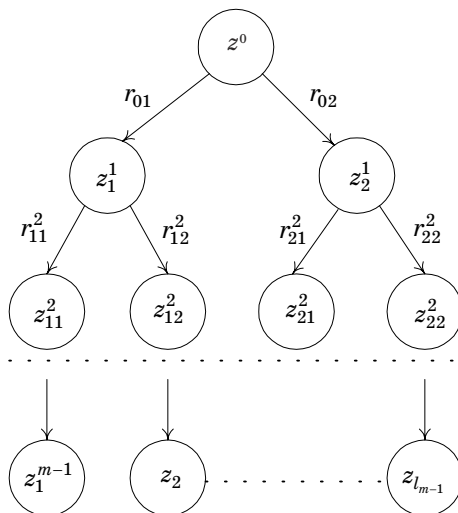


Рис. 4. Дерево системы целей и задач системы

Цели 2-го уровня делятся на цели 3-го уровня и т. д. Более подробно технологии построения деревьев целей рассматриваются в [6]. Поэтому в заключение еще раз лишь подчеркнем особую важность для СИ процедуры целеполагания: *не решение, а постановка задач; не достижение, а выдвижение цели; не доказательство, а формирование теоремы являются критерием «интеллектуальности», особым качеством человеческой психики, отличающим ее от психики животных и от возможностей ЭВМ.* Эффективность принимаемых решений полностью определяется качеством целевой проработки решаемых проблем и задач.

Для достижения сформулированных целей необходимо формировать *средства достижения целей*, используя закономерности осуществимости и развития систем.

Поскольку все промежуточные цели объединены в одну *систему* – ДЦ, то имеется возможность оценить каждую из них с точки зрения той большой цели, достижение которой она должна обеспечить, т. е. *ранжировать* цели. Можно дать оценку и отдельным мероприятиям. Оценка элементов ДЦ осуществляется поэтапно сверху вниз. При этом, поскольку каждый узел связывает не более 7 элементов и эти элементы оцениваются по степени важности q_{jv} с точки зрения достижений ближайшей цели, то есть возможность ввести строгие количественные оценки, используя КОВ.

Если отдельные мероприятия или средства реализации целей входят в несколько разных программ, то можно вывести интегральную оценку, которая позволит учесть множественное значение данного мероприятия с позиций генеральной цели. Для этого рассчитывается интегральный КОВ, равный сумме произведений локальных КОВ мероприятий в рамках каждой цели (программы).

Учитывая, что наиболее распространенным способом представления целей является иерархическая структура «древовидного» типа (ДЦ), далее рассмотрим основные закономерности ее формирования.

Поскольку глобальную цель системы обычно не удается сразу с полной определенностью связать со средствами достижения, ее разбивают на частные, локальные, более простые и конкретные, чтобы появилась возможность установить отношения, связывающие параметры системы, которые можно представить в виде признаков (назовем их целевыми), образующих вектор цели:

$$\mathbf{C} = (C_1 \dots, C_i \dots, C_m); C_i = \Psi(S), i = 1, \overline{m},$$

где C_i – целевой признак; Ψ – функция, определяющая связь состояния системы S и целевого признака C_i . Установление этих соотношений позволяет уточнить, какие параметры, характеристики и подсистемы связаны с данной целью, и наметить связи «цели – средства».

Метод структуризации целей в СИ, состоящий в разбиении исследователем глобальной цели на подцели, что позволяет описать их в терминах характеристик системы и выявить средства их достижения, называется *методом построения ДЦ* (методом декомпозиции, методом квантификации цели). Сущность метода ДЦ состоит в реализации процедуры сведения прагматически некорректного вопроса (сформулированной проблемы) к совокупности вопросов, проблем оптимальной энтропии [5] и характеризуется следующим:

1) ДЦ – это графическое изображение связи между целями и средствами их достижения, построенное по принципу дедуктивной логики с применением некоторых эвристических процедур;

2) ДЦ позволяет представить полную картину взаимосвязей будущих событий (вплоть до получения перечня конкретных задач) и получить информацию об их относительной важности;

3) ДЦ состоит из целей нескольких уровней, представленных в виде иерархии: генеральная цель – цель 1-го уровня – цель 2-го уровня и т. д.;

4) построение ДЦ включает три процедуры: классификацию, композицию и ранжирование.

Для достижения генеральной цели необходимо реализовать несколько целей 1-го уровня (главных целей), выступающих как средство по отношению к генеральной цели. Для достижения целей 1-го уровня потребуется выполнение целей 2-го уровня и т. д. Подцели последующего (нижнего) уровня, для реализации которых не требуется дополнительных увязок «цель – средства», называются *задачами*. Задача служит базой для построения программ достижения отдельных целей. Решение задачи представляет собой комплекс мероприятий, т. е. ресурсов и действий, с помощью которых обеспечивается достижение нужной цели.

При построении ДЦ особое внимание следует уделять выбору генеральной цели. Иногда построение начинается сразу с нескольких главных целей, совокупность которых и представляет собой генеральную цель. Цель высшего уровня разбивается на ограниченное число ветвей в зависимости от сложности объекта управления.

Дерево является весьма распространенной математической моделью любой системы S :

$$S = (X, R_d).$$

Отношение строгого порядка на множестве X называется отношением древесного (древовидного) порядка R_d , если для любых $x, y, z \in X$:

1) из того, что $x < y$ и $x < z$ следует, что x и z сравнимы, т. е. для y и z либо $y < z$, либо $z < y$;

2) на множестве X существует наибольший элемент x_0 .

Множество X с заданным древесным (древовидным) порядком R_d , т. е. пара (X, R_d) называется деревом, а x_0 – его корнем. Для системы в качестве отношения строгого порядка удобно взять включение с доминированием.

Корень ДЦ соответствует генеральной цели, а остальные вершины – подцели, причем по мере опускания по уровням ДЦ становятся все более конкретными и детальными. Разбиение генеральной цели на подцели продолжается до тех пор, пока на нижнем уровне ДЦ не появится полный неизбыточный набор измеримых целей.

Цели нижнего уровня иерархии образуют полный набор, если их реализация достаточна для достижения исходных целей; образуют избыточный набор, если реализация каждой цели из этого набора необходима для достижения исходных целей. Полный избыточный набор является минимальным по количеству входящих в него целей.

Метод структуризации целей с помощью ДЦ основан на деагрегировании исследуемой проблемы на составные элементы с последующей возможной численной оценкой их относительной важности. Поскольку в большинстве древовидных структур, предназначенных для решения тех или иных прикладных задач, содержатся не только цели, но и функции: задачи, средства достижения целей (мероприятия, ресурсы и т. д.), – то нередко их называют деревьями взаимосвязей или деревьями целей – средств [3]. При формировании ДЦ системы соответствующие процедуры должны удовлетворять следующим основным требованиям.

1. В иерархической структуре цели нижележащего уровня всегда необходимо рассматривать как средства для достижения целей вышележащего уровня; при этом они же являются целями для уровня, нижележащего по отношению к ним (свойство «двуликого Януса», наблюдаемое в любых иерархиях). Поэтому в реальных условиях трудно использовать философские понятия цели на всех уровнях иерархии и удобнее этим уровням (а иногда и верхнему уровню) присваивать какие-либо отличные друг от друга конкретные названия (например, в методике ПАТТЕРН: направления, задания, программы и т. п. [9]).

2. В иерархической структуре ДЦ по мере перехода с верхнего уровня на нижний происходит как бы смещение по рассмотренной выше «шкале» от цели-направления (цели-идеала, мечты) к конкретным целям, которые на нижнем уровне иерархии могут выражаться в виде ожидаемых результатов конкретной работы с указанием критериев оценки ее выполнения, в то время как указание критериев на верхних уровнях иерархии ДЦ может быть выражено либо в виде общих требований (например, «повысить эффективность ...»), либо вообще не проводится в формулировке цели.

3. При формировании иерархической структуры следует учитывать ограничение возможности оперативной памяти человека. Обычно исследователи (гипотеза Миллера, число Колмогорова) для того, чтобы человек мог сохранить представление о целостности и успевать анализировать и сравнивать выделенные части, рекомендуют представлять ему одновременно не более чем $2n \pm 2$ компонентов, что и определяет численное значение коэффициента декомпозиции

$D \leq 2(\pi \pm 1)$. Практически для ДЦ это означает, что следует стремиться к тому, чтобы на каждом уровне иерархии дерева число ветвей, подчиняющихся одному узлу (вершине), не превышало 7–9.

Указанный коэффициент декомпозиции D характерен также для большинства организационных социальных структур. В экономических системах этот коэффициент известен как норма управляемости или коэффициент управляемости.

4. Процесс «развертывания» обобщающей цели в иерархической структуре в принципе может быть бесконечен. Однако на практике для удобства пользования структурой (в силу причин, изложенных в п. 3) нужно стремиться число уровней ограничивать до 5–7. Кроме того, на каком-то уровне иерархии возникает необходимость изменить язык описания подцелей, и для того чтобы не создавать сложностей при восприятии структуры, обычно рекомендуется считать одним ДЦ ту часть структуры, которая может быть сформулирована в одном языке. Цели вышележащих уровней в этом дереве детализируются, переформулируются в более конкретные подцели, но в терминах одного и того же языка (например, с политического или экономического), а затем, если необходимо, можно перейти на другой язык (например, с политического на экономический или с экономического на технический, инженерный и т. д.). Так удобнее считать продолжающуюся декомпозицию принадлежащей другому ДЦ. Иногда такое отделение деревьев друг от друга совпадает с разделением системы на подсистемы или с организационной иерархией системы управления. При этом не следует стремиться непременно продолжить предыдущее дерево, а можно строить новое, так как структуризация – это метод исследования целей, лучшего их понимания, а не самоцель.

5. Для того чтобы структура целей ДЦ была удобной для анализа и оценки, к ней рекомендуется предъявлять некоторые общие требования: на каждом уровне иерархии деление должно быть соизмеримым («равномерная» структуризация), а выделенные части, по возможности, логически независимыми; основания (признаки) декомпозиции (при структуризации «сверху») или признаки, объединяющие подцели (при формировании структуры «снизу»), в пределах одного уровня иерархии должны быть неизменными. Совмещение этих требований не всегда выполнимо – иногда приходится смешивать признаки декомпозиции (что будет показано ниже при изложении конкретных методик и в примерах их применения), чтобы обеспечить равномерность структуры ДЦ.

Общими правилами построения ДЦ являются следующие:

– соподчиненность, т. е. элементы нижнего уровня подчиняются элементам более высокого уровня, вытекают из них, обеспечивают их реализацию (имеет место так называемая доминантная иерархия целей);

– сопоставимость, т. е. на каждом уровне ДЦ рассматриваются элементы, сопоставимые по своему масштабу и значимости, полученные в результате детализации по одному принципу. При этом принципы структуризации элементов на одном уровне ДЦ могут быть различными для разных ветвей дерева (научно-технических, производственных и т. д.). Сопоставление элементов друг с другом может осуществляться как для всего уровня, так и в границах одной ветви. Детализация на основе использования одного принципа осуществляется при структуризации однородных целей и задач (или научно-технических, или производственных, или экономических и т. п.);

– полнота, т. е. ДЦ на каждом уровне включает все необходимые для достижения генеральной цели элементы;

– определенность, т. е. формулировка целей и других элементов ДЦ позволяет оценить степень их достижения в количественной или порядковой шкале («больше – меньше», «лучше – хуже»);

– возможность внесения корректировок в дереве взаимосвязей как при изменении самих целей, так и при изменении возможностей их реализации.

К настоящему времени разработано достаточно много разнообразных методик, связанных с различным пониманием содержания и структуры самого дерева. Их можно свести в две группы в зависимости от используемого методологического подхода к построению ДЦ.

Первый подход. В узком смысле слово «построение» ДЦ, как ведущая целевая разработка системы (операции), подразумевает последовательную детализацию целей, осуществляемую по линии главная цель – подцели 1-го уровня – подцели 2-го уровня и т. д. В основу такой детализации положен функционально-содержательный принцип: каждый целевой элемент разбивается на целевые элементы той же природы, только более дробные.

Второй подход. Взамен построения «чистой» иерархии целей реализуется комплекс операций по образованию цепи: цель – мероприятие – ресурсы, т. е. сразу строится совокупное программное дерево, включающее как собственно цели, так и мероприятия по их достижению и требуемое ресурсное обеспечение мероприятий. В этом случае ДЦ объединяет последовательно дерево задач (проблем), де-

рево мероприятий и дерево ресурсов (рис. 5). Тем самым построение ДЦ далеко выходит за рамки целевой разработки системы (операции) и объединяет структурную и ресурсную разработки. В этом случае структура и содержание ДЦ предопределяются программой в целом, т. е. программным деревом.

Наиболее традиционен в методологии СИ в настоящее время первый подход, который развивается по двум направлениям: первое базируется на сборе и обобщении опыта специалистов, накапливающих этот опыт на конкретных задачах СИ; второе основано на обосновании и применении философско-гносеологических концепций представления системы и ее целей.

Используя первое направление, сформируем и обобщим следующие принципы построения ДЦ [8].

1. *Предметный принцип.* В соответствии с предметным принципом элементы ДЦ разбиваются на элементы той же природы, только более дробные, например, увеличение производства товарной продукции – на увеличение производства микросхем, микросборок, электронных компонентов (резисторов, конденсаторов и др.), электронных игрушек и т. д. Иначе говоря, при применении предметного принципа структуризации на разных уровнях ДЦ представлены элементы одного и того же типа, но сформированные с разной степенью детализации. Объектами детализации могут быть не только цели, но и мероприятия, задачи и ресурсы, когда они выражаются в виде конкретных объектов, поддающихся классификации.

Предметный принцип структуризации применяется для того, чтобы раскрыть содержание детализируемого элемента с позиции входящих в его состав компонентов. При применении данного принципа в формулировках детализирующих элементов меняется только объект, на который направлена данная функция. Например, «совершенствование подготовки кадров» детализируется на элементы «совершенствование подготовки кадров руководителей», «совершенствование подготовки кадров рабочих» и т. д.

2. *Функциональный принцип.* При использовании функционального принципа для определения направлений детализации элемен-

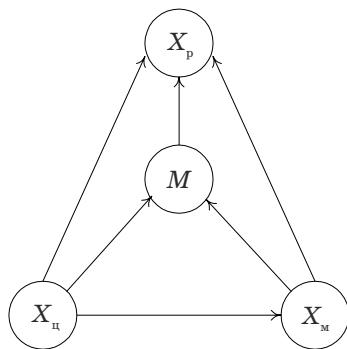


Рис. 5. Программное дерево: $X_{ц}$ – дерево целей; $X_{п}$ – дерево мероприятий; $X_{м}$ – дерево результатов; M – модель

тов необходимо уточнять понятие функции. Введем следующее определение: функция – это вид деятельности элемента, подсистемы, социально-экономической системы, направленный на достижение одной или нескольких целей системы.

Функции выполняют реально существующие системы (коллектив, работник, машина и т. д.). В ДЦ (взаимосвязей) определяется содержание тех функций, которые должны выполняться теми или иными конкретными системами для достижения поставленных целей. Поэтому при использовании функционального принципа выявляются отдельные функции, совокупность которых определяет содержание структурируемой цели и пути ее достижения. Например, цель «повышение уровня хозяйственного руководства» можно детализировать на совершенствование планирования, управления, организации и т. д. Таким образом, функциональный принцип детализации применяется для того, чтобы раскрыть содержание детализируемого элемента с позиций определения направлений действий по достижению целей данного элемента. При применении данного принципа в формулировках детализирующих элементов меняются содержание функций, направление действия. Например, функцию управления можно детализировать на целеполагание, прогнозирование, планирование и т. д. на любом уровне управления.

При конкретизации понятия отдельных элементов, полученных на основе функционального принципа, применяются приводимые ниже принципы структуризации.

3. *Принцип охвата всех факторов* (направлений), влияющих на решение рассматриваемой проблемы, и трансформации их в цели или мероприятия. Например, в ДЦ улучшения использования металла на приборостроительном предприятии в подцели «улучшение использования конструкционных факторов экономии металла» выделяются такие элементы как «уменьшение запасов прочности конструкции», «упрощение формы конструкции», «внедрение специальных профилей» и т. д.

4. *Принцип адресности*. В этом случае та или иная цель, мероприятие или другой элемент конкретизируется по месту исполнения. При использовании данного принципа ДЦ строится не только для экономической системы в целом (например, отрасли), но и для ее отдельных компонентов (предприятий, цехов, участков и т. д.). Таким образом, мы можем начать решать другую задачу – построение ДЦ не только для изучаемого объекта, но и для его составных элементов.

Следует отметить, что в дереве мероприятий адресная привязка может быть осуществлена косвенным образом при использовании

предметного принципа структуризации. Например, когда производится детализация комплекса мероприятий по улучшению качества продукции на такие составные компоненты как «улучшение качества сырья», «улучшение технологии», «улучшение станочного парка» и т. п., одновременно происходит их адресная привязка, поскольку по мере конкретизации мероприятий происходит и их распределение по определенным подразделениям, которые должны выполнять отдельные мероприятия.

5. *Принцип структуризации детализации ДЦ по этапам производственного цикла* (производство, распределение, обмен, потребление) или жизненного цикла объектов в СИ [1].

6. *Принцип детализации ДЦ по этапам принятия решения.*

7. *Принцип детализации ДЦ по составным элементам процесса производства* – средства труда и предметы труда (например, повышение надежности технической системы, повышение долговечности инструмента и т. д.).

8. *Принцип детализации по признаку, характеризующему структуру хозяйственного комплекса*, отраслей, предприятий: промышленность, сельское хозяйство, транспорт и т. д.

Соответственно могут выделяться такие цели как развитие промышленности и отдельных ее отраслей, совершенствование работы определенного цеха на предприятии и т. п. Заметим, что во многих задачах данный принцип может совпадать с адресным.

Безусловно, в одном дереве использовать все эти принципы структуризации не следует, все зависит от содержания конкретных задач и от уровня исследуемой проблемы.

Использование данных принципов структуризации в определенной последовательности дает возможность, постепенно конкретизируя содержание элементов, добиться требуемого уровня детализации – получения измеримых целей. Действительно, каждый из указанных принципов, взятый в отдельности, является только теоретической абстракцией. На практике не существует в отдельности, скажем, функции планирования и соответственно функциональной цели – «совершенствование планирования», она обязательно должна быть привязана к определенному объекту. Например, такая функциональная цель как «совершенствование планирования сбыта на промышленном предприятии» является пересечением второго и четвертого принципов структуризации (планирование и сбыт рассматриваются как отдельные функции).

Выбор принципа структуризации элементов дерева и ее глубина в существенной мере зависят также от того, характеризуют или нет

ключевые слова (являющиеся объектом структуризации и содержащиеся в формулировке элемента дерева) реальный объект (обувь, самолет, микросхема, ЭВМ и т. д.) или понятие (производительность труда, качество продукции и т. д.). Во втором случае возможность применить сразу предметный принцип структуризации отсутствует.

Направление и глубина структуризации зависят также от того, являются или нет ключевые слова однозначными, четко определенными понятиями. Например, в такой цели как «повысить производительность труда» является однозначным ключевое понятие «производительность труда», в него вкладывается определенный смысл. Его можно структурировать только с позиции конкретизации видов работ и адресной привязки с целью определения требуемого значения уровня повышения производительности труда и мероприятий по достижению данной цели.

Другое дело, если производится структуризация такой цели как «повысить качество выпускаемой продукции». Данную цель обязательно надо структурировать в направлении раскрытия понятия «качество», поскольку оно, во-первых, не является однозначным, а, во-вторых, «качество продукции» – сложносоставное понятие, включающее такие компоненты как надежность, эффект от эксплуатации, эстетичность, эргономичность и т. д.

Однако такой подход не гарантирует полноты анализа. Это, в частности, обусловлено тем, что указанные методики разрабатывались вне связи с принятой концепцией системы. Кроме того, ранние методики не отвечали в полной мере требованиям технологии разработки ДЦ, предусматривающим установление последовательности определенным образом выделенных и упорядоченных этапов с регламентируемыми или рекомендуемыми технологическими картами и инструкциям, приемами и методами их выполнения. Поэтому в дальнейшем в поисках принципов, обеспечивающих полноту структуры целей, исследователи обратились к философскому обоснованию концепций системы и разработки на этой основе моделей системы, позволяющих отразить эту концепцию и гарантировать полноту структуризации, по крайней мере в принятой концепции и моделях, ее отображающих.

Одной из наиболее распространенных методик, использующих указанное направление первого подхода, назовем методику, принципиальной особенностью которой является то, что она основана на концепции системы, учитывающей среду и целеполагание [2], и исходит из следующего определения системы: под системой следует

понимать конечное множество функциональных элементов и отношения между ними, выделенное из среды в соответствии с определенной целью в рамках определенного временного интервала. Таким образом, это определение учитывает понятие «цель», а следовательно, и процесс целеобразования, который требует анализа взаимодействия системы со средой. При этом рассматриваются следующие уровни структуризации.

1. Формирование глобальной цели системы. Цель должна описывать конечный продукт (КП), для получения которого существует или создается система. КП может быть любой результат социальной деятельности: материальная продукция, новый научный результат, научная информация, управленческие решения и т. п.

2. Декомпозиция по признаку «виды конечного продукта». Осуществляется в тех случаях, когда система производит разные виды КП, которые зависят от того, для чего строится структура целей. Если речь идет о производстве, то КП является выпускаемая продукция, а если строится структура целей аппарата управления, то это планы, решения и другие нормативно-методические документы, обеспечивающие выпуск соответствующих видов продукции.

3. Декомпозиция по признаку «иницирования целей». Формулируются подцели исследуемой системы, инициируемые потребностями окружающей среды, влияющей на производство КП. При этом все системы, с которыми взаимодействует исследуемая в процессе производства КП система, делятся на четыре класса: вышестоящие системы, формирующие главные требования к КП; нижестоящие (подведомственные) системы, требования которых выступают в основном в качестве ограничений на свойства КП или потребностей в организации ремонта и других видов обслуживания материально-технической базы для производства КП; существенная (или актуальная) среда, т. е. системы, которые имеют отношение к производству КП проектируемой или исследуемой системы (поставщики, потребители, аналогичные предприятия, опыт которых может оказаться полезным, и т. п.); исследуемая система, которая всегда, помимо глобальной цели, стремится к достижению целей, инициируемых собственными (внутренними) потребностями, мотивами, а также трансформирующихся в требования к КП.

4. Декомпозиция по признаку «жизненный цикл». Определяются различные подэтапы получения конечных продуктов в зависимости от их видов – от формирования и прогнозирования потребности в продукте до потребления или поставки заказчику.

Начиная с этого уровня декомпозиции, обычно удобнее оперировать не термином «подцель», а термином «функция» и считать, что дерево целей как бы перерастает в дерево функций.

5. Декомпозиция по основным элементам (составу) системы. В результате формируются функции, вытекающие из потребностей основных элементов системы, объединяемых в три основные группы: кадры (К), предметы деятельности (ПД), средства деятельности (СД). Отношения между этими тремя группами элементов и КП должны включать в себя и статический, и динамический аспекты, т. е. процессы по производству КП и организационную структуру.

6. Декомпозиция по признаку «управленческий цикл».

7. Декомпозиция по признаку «делегирование полномочий».

В зависимости от приложений последовательность признаков декомпозиции может изменяться (например, во многих приложениях вначале использовался признак «инициирования цели», а затем уже «виды конечного продукта»).

При структуризации элементов на целевых уровнях дерева необходимо дать ответ на вопрос: какой результат должен быть достигнут? При этом учитывается, что ответ на вопрос «когда?» для всего ДЦ получен при определении интервала времени, для которого оно строится. Для структуризации комплекса целей и мероприятий как функций времени необходимо использовать иные методы, нежели структуризацию с помощью деревьев, например, структурно-временные методы сетевого планирования и управления и т. д.

После того как получена достаточная степень конкретности при определении функционального содержания структурируемой цели, следует использовать предметный принцип структуризации, т. е. раскрыть предметное содержание каждой целевой функции. Например, при дальнейшей конкретизации цели «совершенствование сбыта на промышленном предприятии» указываются конкретные виды промышленной продукции, сбыт которых необходимо осуществить.

Одна из важных задач, решаемых в процессе построения ДЦ – оценка степени достижения поставленных целей. Поэтому построение ДЦ необходимо довести до уровней, на которых цели измеримы в указанном выше смысле. Поэтому при структуризации целесообразно выявить конкретные требуемые значения уровня достижения поставленных целей.

Следовательно, построение ДЦ может заканчиваться изложением требований к уровню достижения отдельных конкретных целей или их нормативных значений.

Здесь следует отметить, что нормальные значения не обязательно формируются только на последнем уровне ДЦ. В ряде случаев можно определить нормативные (требуемые) значения отдельных целей параллельно со структуризацией этих целей, т. е. представить такие нормативы на каждом уровне дерева, а не только на последнем. Например, в ДЦ по сокращению длительности цикла «исследование – производство» может быть определено нормативное значение снижения длительности данного цикла как в целом, так и по его отдельным этапам и стадиям: научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, освоение в производстве и т. д.

Завершая рассмотрение первого методологического подхода построения ДЦ систем, следует особо отметить, что приемы, применяющиеся при построении иерархических ДЦ системы, можно свести к соответствующим вариациям двух методологических подходов:

- 1) формирование структур «сверху» – методы декомпозиции, целевой или целенаправленный подход;
- 2) формирование структур ДЦ «снизу» – морфологический, лингвистический, тезаурусный (терминальный) подходы или методы «языка систем».

На практике обычно эти подходы к построению ДЦ систем сочетают. Но даже и при таком комбинировании методов построения ДЦ при формулировании целей и подцелей не всегда удается их конкретизировать на уровне (языке) средств их выполнения, т. е. функций, и отразить сразу (особенно в начале СИ) в формулировке целей критерии их оценки. Не всегда также одной подцели соответствует один способ реализации функций системы и один критерий оценки эффективности достижения глобальной цели системы. Поэтому в настоящее время бурное развитие и применение в практике СИ находит второй методологический подход, в соответствии с которым строят наряду с ДЦ системы и дерево средств достижения целей, мероприятий, функций (ДФ), дерево ресурсов (ДР), дерево качеств (ДК) и дерево критериев эффективности (ДЭ) системы, соответствующие ДЦ системы.

Итеративное «циклическое» рассмотрение системы $ДЦ \leftrightarrow ДФ \leftrightarrow ДР \leftrightarrow ДК \leftrightarrow ДЭ$ в существенной мере способствует эффективности ее в СИ, построению ее модели управления и, наконец, эффективности ее вещественно-энергетической и организационно-информационной или социально-экономической реализации при проектировании, а также совершенствованию разнообразных систем. В этой связи рассмотрим в качестве примера формирование ДФ системы, что

является основой построения математических моделей систем и повышения их адекватности.

Конкретные методики построения ДЦ рассматриваются в [2–5], поэтому отметим лишь одно очень важное обстоятельство: в хорошо организованной системе за выполнение каждой цели должен нести ответственность один единственный орган управления (структурный элемент). Иначе говоря, иерархия ДЦ должна совпадать с иерархией дерева ограниченной структуры. В противном случае будут задачи, которые некому решать, и структурные элементы организации, которым нечего делать.

Из требования соответствия ДЦ дереву структуры вытекает, что высший в данной системе орган управления нулевого ранга ставит задачи органам 1-го ранга, те, в свою очередь, ставят задачи органам управления 2-го ранга и т. д. Так функционирует не только организационная система, но и отдельные люди, которые ставят перед собой какую-либо цель, достигают ее благодаря тому, что последовательно, по этапам решают ряд задач, являющихся декомпозицией поставленной цели. В этой связи еще раз подчеркнем, что сформулировать цель, поставить задачу, осуществить их декомпозицию – все это также означает принятие того или иного решения. Заметим, что формулировка целей, постановка задач – процесс исключительно интеллектуальный и творческий: он относится почти целиком к неформальной части принятия решений и в очень сильной степени зависит от искусства и интуиции ЛПР.

Повышению адекватности степени структуризации целей способствуют методологии формирования фракталов, графталов, кустов и т. д. При этом под фракталами понимают объекты любой природы, вид и форма которых остаются неизменными независимо от масштаба – т. е. подобны сами себе. Самоподобие в широких диапазонах масштабов действительно встречаются в самых разных предметах и явлениях, что и позволило «крестному отцу» фракталов Бенуа Мандельброту провозгласить, что геометрия Природы фрактальна [10].

Суть построения фракталов заключается в последовательной иерархической развертке: каждый элемент, считавшийся на одном шаге – при одном масштабе – простым, неделимым, на следующем (более мелком масштабе) заменяется набором подобных ему элементов, те опять заменяются и т. д. Такой процесс хорошо моделирует процесс воплощения творческого замысла, когда из исходной смутной идеи, последовательно развертываясь, возникает четкая задача, роман, научная теория или модель. Более наглядно это видно в

проектировании, когда все более детальными чертежами – в разных масштабах – последовательно развертывается вся конструкция; или в написании программ для ЭВМ, когда составляются все более подробные блок-схемы алгоритма.

В случае с ЭВМ программу обычно пишут на языке высокого уровня, а компьютер «понимает» только язык своих машинных программ. Поэтому специально созданная программа-транслятор должна переводить текст программы с одного языка на другой. При этом каждая команда языка высокого уровня, последовательно заменяясь, в итоге представляется цепочкой машинных команд. Чтобы облегчить написание трансляторов, на стыке лингвистики и информатики возникла теория формальных грамматик, позволяющая строго задавать взаимоотношения между алгоритмическими языками. Одной из таких грамматик и является грамматика фракталов или L-система, модулирующая рост биосистем (подробнее см. в [9]).

Если признана необходимость достижения цели и осуществлена ее декомпозиция до уровня независимых задач, то далее в СИ можно переходить к процедуре формирования средств реализации цели.

ПОДБОР СРЕДСТВ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ

В силу свойств человеческой психики представление о *цели* сразу же сопровождается представлением о *средствах* ее достижения. Характер и масштабы человеческой деятельности, ее цели и задачи в решающей степени зависят от тех свойств, которые созданы в ходе исторического развития человечества. Из этого обстоятельства вытекают два принципа системного подхода [1]:

первый принцип гласит, что средства достижения цели вытекают из самой цели;

второй принцип требует, чтобы цели нижнего уровня являлись средствами достижения целей верхнего уровня.

Эти два принципа позволяют развернуть генеральную цель в иерархический граф или дерево целей и средств. Движение средств имеет строго объективную природу, не зависящую от субъекта. При этом главным критерием взаимодействия отношения соответствия средств целям является критерий целесообразности.

Целесообразность выступает как отношение, особый вид связи в рамках взаимосвязи начального и конечного состояния системы. Это может быть «связь состояний», при которой наблюдается соответствие структуры объектов, и целесообразность выступает в форме их эффективности.

Целесообразность, как особая форма причинности, реализуется через отношение цели, средства и результата. Триединство «цели – средства – результаты» в теории систем называется эффективностью систем. Концептуальная модель эффективности показана на рис. 6:

$$R_{ц} = (R_{рц}, R_{сц}, R_{рс}), \quad (1)$$

где $R_{ц}$ – отношение обеспечения эффективности системы; $R_{рц}$ – отношение целевой эффективности системы; $R_{сц}$ – отношение потенциальной эффективности системы; $R_{рс}$ – отношение экономической эффективности системы (см. гл. VI).

Модели отношений эффективности системы (1) могут быть поставлены в соответствие следующей модели комплексных показателей эффективности системы:

$$W_o = (W_{ц}, W_{п}, W_{ф}), \quad (2)$$

где W_o – комплексный показатель общей эффективности; $W_{ц}$ – комплексный показатель целевой эффективности системы; $W_{п}$ – комплексный показатель потенциальной эффективности системы; $W_{ф}$ – комплексный показатель функциональной эффективности системы.

Модели отношений эффективности системы (1) может быть поставлена в соответствие и другая модель показателей

$$W_o = (W_n, W_p, W_э), \quad (3)$$

где W_n – комплексный показатель надежности системы; W_p – комплексный показатель результативности (производительности) системы; $W_э$ – комплексный показатель экономичности системы.

Модель (2) предназначена для исследования программ создания больших социально-экономических и организационных систем, а модель (3) – для технических и технологических систем и операций. На основе моделей (2) и (3) при необходимости строится универсальная модель эффективности любых сложных и больших систем

$$W_o = \left\{ \begin{array}{l} W_{ц.н}, W_{ц.п}, W_{ц.э} \\ W_{п.н}, W_{п.п}, W_{п.э} \\ W_{ф.н}, W_{ф.п}, W_{ф.э} \end{array} \right\}, \quad (4)$$

где $W_{ц.н}, W_{ц.п}, W_{ц.э}$ – комплексные показатели целевой надежности, результативности и экономичности соответственно; $W_{п.н}, W_{п.п}, W_{п.э}$ – комплексные показатели потенциальной надежности, результативности и экономичности соответственно; $W_{ф.н}, W_{ф.п}, W_{ф.э}$ – комплексные показатели функциональной надежности, результативности, экономичности соответственно.

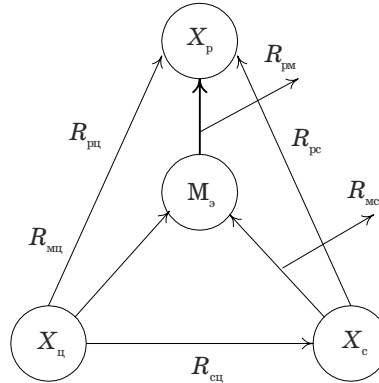


Рис. 6. Модель отношений эффективности системы: $X_{ц}$ – цели; $X_{с}$ – средства; $X_{п}$ – результаты; $M_{э}$ – модель эффективности; R_{ij} – отношения эффективности

Задача СИ состоит в том, чтобы наполнить комплексные показатели концептуальных моделей (2)–(4) конкретным структурно-функциональным содержанием на уровне средств достижения цели. При этом исходят из того, что процесс создания системы для реализации сформулированной цели является, по существу, процессом последовательного формирования и преобразования (трансформации) комплекса средств достижения целей в форме функционально-структурной организации средств достижения целей системы на функциональном языке в следующей последовательности:

- 1) формирование с учетом дерева целей ДФ системы;
- 2) декомпозиция функций системы до уровня принятого базового набора <РМТС>-операторов, где Р – оператор преобразования, М – оператор хранения, Т – оператор транспорта, С – оператор управления этими процессами;
- 3) формирование модели функциональной структуры системы;
- 4) формирование модели морфологической структуры системы.

В свою очередь, для формирования ДФ системы требуется выполнение следующих исследовательских работ.

1. Анализ систем-прототипов: выявление основных и дополнительных функций; построение обобщенного ДФ; выявление базовых структур; анализ принципов технической или организационной реализации.
2. Исследование дерева противоречий системы: анализ «узких мест» системы прототипов; выявление ограничивающих факторов; выявление основного противоречия системы; построение дерева противоречий системы; анализ дерева противоречий системы.
3. Анализ тенденций, общих закономерностей развития системы, их функционально-структурной организации с целью разработки предположений по разрешению противоречий системы.
4. Формирование концепций системы: выявление, формирование способов преодоления противоречий системы; поиск альтернатив технической или организационной реализации системы; определение совокупности показателей качества системы.

Собственно работы по формированию ДФ системы предусматривают следующие этапы.

1. Определение множества базовых и дополнительных функций системы.

Множества базовых функций системы формируются на основании технического задания на проектирование или ДЦ системы. На этом этапе система рассматривается как некоторое функциональное устройство. Определяется совокупность требований к входным и выходным вещественно-энергетическим и информационным потокам и

правилам преобразования <PMTC>-операторов – алгоритмам функционирования системы.

2. Формирование ДФ системы.

Построение ДФ системы предполагает декомпозицию основных и дополнительных функций этой системы (рис. 7). Декомпозиция производится до уровня операторов, соответствующих компонентам используемой ими организационной или элементной базы, или до уровня, соответствующего стандартным подпрограммам.

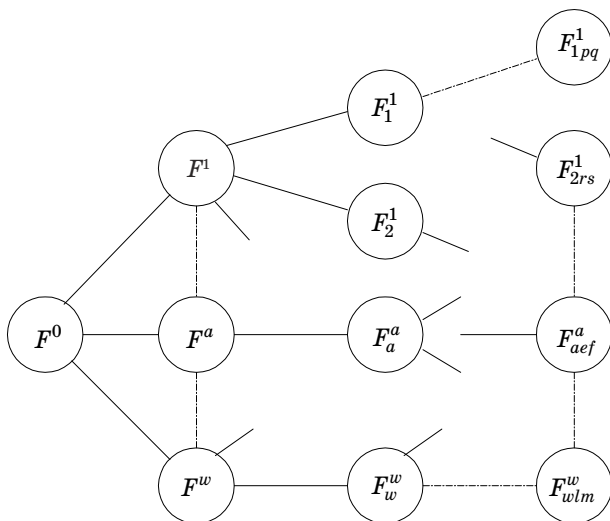


Рис. 7. Декомпозиция основных и дополнительных функций системы

3. Построение и анализ операторных моделей.

На этом этапе формируется ряд операторных моделей, соответствующих различным уровням абстракции системы, а также обобщенная операторная модель системы. Построение таких моделей позволяет проанализировать внешние и внутренние связи системы.

Анализ операторных моделей дает возможность произвести оценку качества декомпозиций базовых функций системы – проверить соответствие выделенных в процессе декомпозиций модулей уровню детализации каждого конкретного уровня, а также организовать функционирование модулей каждого уровня с учетом общих принципов иерархической организации системы. Необходимо отметить, что при выделении уровней используется виртуальное представление системы. При переходе с уровня на уровень детализируются связи между отдельными компонентами.

4. Построение и анализ временных диаграмм активностей.

В результате выполнения этого этапа строятся модели инициирования активностей в системе в точках квантования и формируются множества функциональных модулей (ФМ), активных на определенном цикле функционирования системы. На основании построенных диаграмм множества функциональных модулей каждого уровня разделяются на активные и пассивные.

Функционирование систем может быть представлено как взаимосвязанное протекание ряда процессов R^α , R^β и т. д. (Учет событийности является основой событийного моделирования в СИ). Процессы различаются функциями F_k , приоритетами α_i , запросами на ресурсы β_m . При таком подходе четко прослеживается связь процесс – активности – цепочка <PMTC>-операторов (рис. 8). При этом процесс на уровне i порождает на $(i+1)$ -м уровне связанный набор активностей, каждая из которых реализуется совокупностью < P_{i+1}^{j1} , M_{i+1}^{j2} , T_{i+1}^{j3} , C_{i+1}^{j4} >-операторов. Реализация функционального оператора определенного уровня системной организации отождествляется с процессом для следующего нижнего уровня.

5. Выполнение эквивалентных преобразований на уровне операторов и ФМ.

Эквивалентные преобразования производятся, как правило, для минимизации структуры системы или обеспечения заданного быстродействия. Одной из возможных стратегий преобразования может являться минимизация числа типов модулей создаваемой или анализируемой системы.

Для реализации эквивалентных преобразований на уровне операторов и ФМ производятся следующие операции.

- Анализ вариантов расширения функциональных возможностей.

Расширение функциональных возможностей системы может быть осуществлено за счет использования ФМ, пассивных на отдельных тактах (циклах) протекания процесса функционирования системы, а также путем увеличения числа активных компонентов за счет временного разделения и (или) совмещения функции модулей различных уровней.

- Изменение связей и перераспределение функций между модулями системы.

Эта операция производится на основе проводимого СИ и является также реализацией одного из эвристических приемов синтеза эффективных систем, базирующихся на принципе многофункциональности – количественного изменения функциональной нагрузки за счет аппаратного или программного временного совмещения (разделения) реализуемых функций (рис. 9).

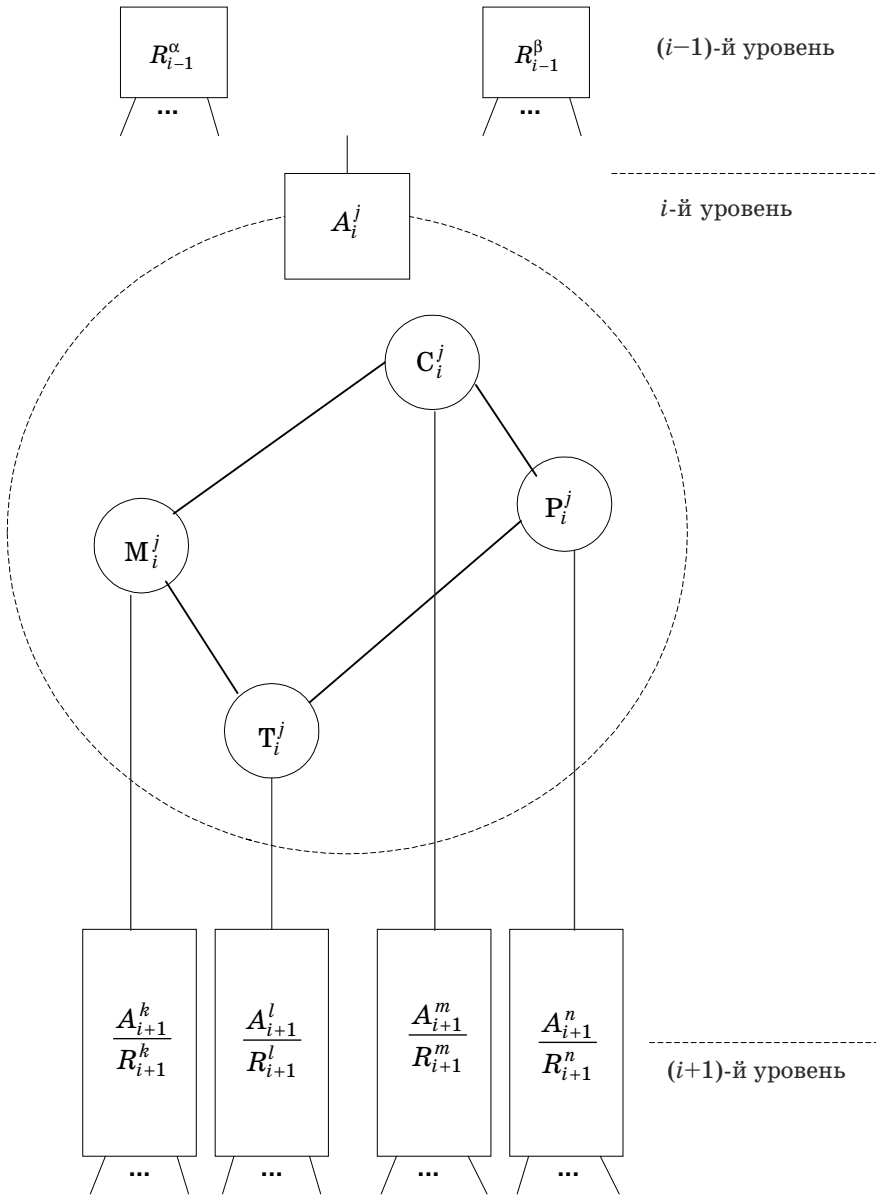


Рис. 8. Декомпозиция процессов в активности



Рис. 9. Преобразование функциональной структуры системы

- Анализ возможностей перераспределения числа активных и пассивных ФМ.

Активные и пассивные модули могут перераспределяться с учетом специализации системы, спектра применения и предполагаемого времени использования. Действительно, чем с большей степенью универсальности создается система, тем больше возможностей для функционального расширения (расширения множества реализуемых функций) должно быть в нее заложено при проектировании. Чем уже проблемная ориентация системы, тем строже определяется множество реализуемых функций и требования к качеству их реализации.

- Формирование отдельных элементов функциональной структуры системы.

На этом этапе необходимо также обратить внимание на полноту функциональной загрузки модулей и максимальное использование однотипных многофункциональных модулей. Это особенно важно для организационных систем.

6. Формирование функциональной структуры системы.

Создаются базовые функциональные структуры с учетом различных вариантов временных соотношений между отдельными процессами. Затем в соответствии с принятой стратегией СИ выбирается вариант функциональной структуры, наилучшим образом отвечающий выбранной совокупности показателей качества.

7. Отображение функциональной структуры системы на множество конструктивных или организационных модулей системы.

На этом этапе решается круг задач, связанных с выполнением отображения множества ФМ, отражающих совокупность функциональных связей в системе, на множество конструктивных (КМ), организационных (ОМ), экономических (ЭМ) или хозяйственных (ХМ) модулей, т. е. имеет место последовательность отображений

$$\{F\} \rightarrow \{\Phi M\} \rightarrow \{KM\} \text{ или } \{F\} \rightarrow \{\Phi M\} \rightarrow \{OM\};$$

$$\{F\} \rightarrow \{\Phi M\} \rightarrow \{EM\} \text{ или } \{F\} \rightarrow \{\Phi M\} \rightarrow \{XM\}.$$

Для синтеза структурных решений необходим выбор унифицированных технических и организационных средств и оценка необходимости разработки оригинальных подсистем (модулей) (см. рис. 9).

8. Выбор рациональной структуры системы.

Выбор рациональной структуры осуществляется с учетом степени ее сложности, однородности и регулярности структуры производственных и управляющих подсистем. Прокомментируем работы по формированию ДФ.

Декомпозиция множества основных и дополнительных функций производится до принятой степени декомпозиции. Основное требование, предъявляемое к элементам определенного уровня декомпозиции, – одинаковая степень детализации описания процессов, протекающих в системе. Каждый уровень отражает набор функций, реализуемых системой с определенной степенью детализации.

Выделим следующие уровни декомпозиции:

уровень 0 – система рассматривается как целостный ФМ, предназначенный для воспроизведения целевой функции;

уровень 1 – элементами декомпозиции являются функциональные подсистемы, реализующие множество основных и дополнительных функций;

уровень 2 – элементами этого уровня являются функциональные блоки, множество которых определяется из соображений полноты реализации базовых функций;

уровень 3 – этому уровню обычно соответствуют функциональные элементы, отражающие декомпозицию множества основных и дополнительных функций на функциональные операторы <РМТС>-типов;

уровень 4 соответствует функциональным возможностям типовых модулей, реализующих элементарные операции по операторам, воспроизводимым используемой элементной базой.

Выделенные уровни декомпозиции можно разделить на три группы:

1-я группа соответствует функциональному назначению системы (уровень 0);

2-я группа отражает проблемную ориентацию системы и функциональную ориентацию отдельных ее подсистем (уровни 1 и 2);

3-я группа отражает способы реализации ФМ посредством набора функциональных операторов <РМТС>-типов (уровни 3 и 4).

Декомпозиция производится с учетом специфики применения системы и отражает ее проблемную ориентацию в соответствии с требованиями технического задания или целевой функции системы. Функциональная структура системы и ее математическая модель формируются на основе ДФ, содержащего информацию о множестве основных и дополнительных функций. При этом необходимо обратить внимание на следующее.

При построении ДФ системы следует учитывать два аспекта иерархической декомпозиции функций. Во-первых, при разложении различных функций, принадлежащих i -му уровню иерархии, на множество функций более низкого $(i+1)$ -го уровня может оказаться, что во вновь полученных множествах функций имеются совпадающие

элементы. Это, однако, не означает, что при дальнейшей декомпозиции можно безусловно исключить из рассмотрения одну из пар совпадающих функций. Такое исключение возможно лишь на этапе формирования ФМ, так как ввиду возможного параллелизма при реализации цели системы может возникнуть потребность в одновременном воспроизведении идентичных преобразований над различными функциями. Во-вторых, при декомпозиции некоторой функции i -го уровня F может обнаружиться, что на последующем $(i+1)$ -м уровне функция отображается без разложения на составляющие, т. е. $F_i = F_{i+1}$.

На основе анализа систем прототипов и общих закономерностей развития систем в соответствии с требованиями технического задания или ДЦ системы осуществляется формирование множества основных и дополнительных функций системы. Множество основных функций определяет класс системы. Изменение этого множества порождает систему нового класса. Множество дополнительных функций определяет такие качества системы, как надежность, живучесть, сервис, предоставляемый пользователям системы, и т. п. Изменение множества дополнительных функций порождает различные варианты систем данного класса, определяемого множеством основных функций.

На данном этапе СИ осуществляется анализ множества основных и дополнительных функций системы. На основе анализа этих функций устанавливается их преемственность с функциями, характерными для систем рассматриваемого класса, сформировавшимися в процессе эволюции. Такое сопоставление позволяет уточнить состав функций, учитывая особенности условий эксплуатации системы и ее конкретного применения. Процесс формирования ДФ системы существенно облегчается при наличии в распоряжении разработчика или исследователя ДФ систем-прототипов. В результате декомпозиции основных и дополнительных функций формируется ДФ. Каждый последующий уровень функционального представления получается из предыдущего в результате декомпозиции функций, расположенных на предыдущем уровне. Каждый новый, более подробный уровень описания функций, реализуемых системой, отличается уменьшением уровня абстракции и повышением степени детализации.

С учетом многоуровневости декомпозиции каждая из функций может рассматриваться как макрофункция и/или микрофункция, в зависимости от уровня рассмотрения. Теория и практика декомпозиции функций показывает, что реальное число микрофункций MF $(i+1)$ -го уровня, формируемых в результате декомпозиции макрофункции NMF i -го уровня, сравнительно невелико (не превосходит $2\pi \pm 1$).

При большом числе выявленных микрофункций целесообразно увеличить число функций предыдущего уровня декомпозиции.

Реальные ограничения числа уровней при формировании ДФ системы определяются разумной начальной ориентацией на определенную элементную базу в широком смысле этого слова. При рассмотрении ДФ отмечалось, что декомпозиция основных и дополнительных функций осуществляется до уровня микрофункций, соответствующих функциональным возможностям модулей, которые могут быть использованы для реализации системы. Ограничение на число уровней декомпозиции связано с прагматическим подходом к СИ. Современные системы должны создаваться, как правило, в минимальные сроки при максимальном использовании унифицированных компонентов. Не исключается и более глубокая декомпозиция основных и дополнительных функций проектируемых систем. Такая декомпозиция при глубоком анализе и тщательном исследовании могла бы породить оригинальные и возможно более совершенные конфигурации системы, базирующиеся, например, на новых физических (или иных) принципах.

Как было показано [1], методология СИ предусматривает расчленение процесса СИ на ряд страт, каждой из которых соответствует определенный уровень представления объекта СИ. Конкретная страта определяется спектром задач, решаемых моделями, используемыми в СИ. Причем процесс СИ можно рассматривать как последовательное пополнение исходного описания недостающей информацией и формирование ряда последовательно уточняющих моделей, пока минимальные компоненты описания не будут соответствовать принятому «элементному базису».

Преобразование операторных моделей системы направлено на повышение степени однородности структуры, минимизацию числа и снижение сложности вещественно-энергетических и других процессов и ориентировано на максимальное использование типовых решений при формировании структуры системы. Существенное улучшение показателей качества системы по сравнению с прототипами достигается при использовании новых физических, экономических или организационных принципов для реализации вещественно-энергетических и организационно-информационных операторов системы.

В преобразованиях в соответствии с принятой концепцией создания системы ее операторная модель является основной для формирования функциональной структуры системы и ее математической модели. В этой структуре каждой совокупности выделенных опера-

торов соответствует адекватный функциональный модуль и устанавливается определенная соподчиненность связей между модулями.

Методика формирования операторов определенного уровня декомпозиции ДФ и синтез обобщенной операторной математической модели включает решение следующих задач:

- 1) анализ алгоритмов моделируемых процессов и определение их характеристик;
- 2) формализацию описания алгоритмов;
- 3) формирование операторных схем алгоритмов и их оптимизацию;
- 4) анализ возможности покрытия ветвей алгоритма типовыми ФМ;
- 5) эквивалентные преобразования алгоритма с целью улучшения покрытия;
- 6) формирование упорядоченных наборов операторов для реализации процессов i -го уровня;
- 7) совмещение операторных схем алгоритмов и фрагментов ДФ;
- 8) выполнение оптимизирующих эквивалентных преобразований на уровне операторных схем с целью достижения максимального соответствия выполняемых на предыдущем этапе совмещений;
- 9) формирование окончательного варианта операторной модели.

Выше отмечалась целесообразность операторного представления функций системы. Операторы могут быть представлены в аналитической, табличной и графической формах. От операторов может быть осуществлен простой переход к ориентированным графам, для которых разработан достаточно совершенный аппарат эквивалентных преобразований. Операторная схема описывает последовательность информационных процессов и их логическую взаимосвязь с учетом тактов обработки информации. Операторное представление системы на различных уровнях облегчает переход к структуре на основе ФМ. Рассмотрим эти переходы подробнее на примере модели ФМ информационной системы.

Деятельность ФМ любого i -го уровня полностью определяется совокупностью входных информационных потоков, внутренних функциональных преобразований и выходных информационных сигналов. ФМ представляет автомат $\langle X, A, Y; g, f \rangle$, где X – множество сигналов на входе; A – множество внутренних состояний; Y – множество сигналов на выходе; g – операция, ставящая в соответствие сигналу на входе и внутреннему состоянию определенное новое состояние; f – операция, определяющая по входному сигналу и внутреннему состоянию сигнал на выходе.

Таким образом, совокупность функциональных операторов, реализуемых ФМ _{i} , преобразует функциональные отношения, заданные

множеством X , в совокупность функциональных отношений множества Y посредством отображения во множество A .

На рис. 10 представлена операторная модель ΦM_i , реализующего j -ю функцию на i -м уровне. Модуль ΦM_i реализует следующие функции:

- прием информации T_{i-1} в систему-оператор T_{i-1} , разделение входного, информационного потока, выделение служебной информации, различные структурные преобразования кодов – оператор P_i ;
- сопоставление с информацией, записанной в системе, – операторы P_i, M_i ;
- формирование выходного информационного потока – операторы C_i, P_i, M_i ;
- выдачу ответной информации – оператор T_{i+1} .

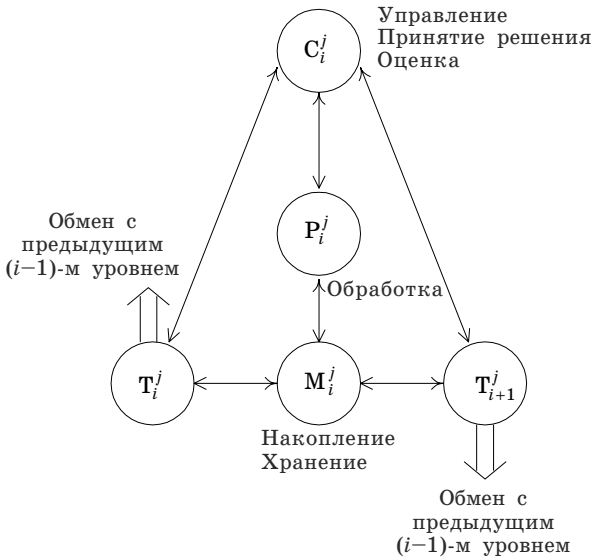


Рис. 10. Операторная модель ФМ

В процессе преобразования и передачи информации необходимо принимать во внимание пространственно-временные характеристики среды протекания процессов; t – временные характеристики (продолжительность действия оператора); l – пространственные характеристики (отображение единицы информации в пространстве); S – структурные характеристики (структурное представление информации).

Реализация функционального оператора хранения M_i связана с изменением временных характеристик Δt , оператора передачи T_i – с

изменением пространственных характеристик Δl , а оператора обработки P_i отражает изменения в структурном представлении элементов информационного потока (рис. 11).

Оператор управления C_i отражает формирование внутренних связей в модуле, иницируя процессы P , M , T , а также организацию внешних связей ΦM_i с модулями $(i+1)$ -го и $(i-1)$ -го уровней.

Можно показать, что сводимость оператора управления C_i i -го уровня порождает на уровне $(i+1)$ совокупность $\langle P_{i+1}, M_{i+1}, T_{i+1} \rangle$ -операторов.

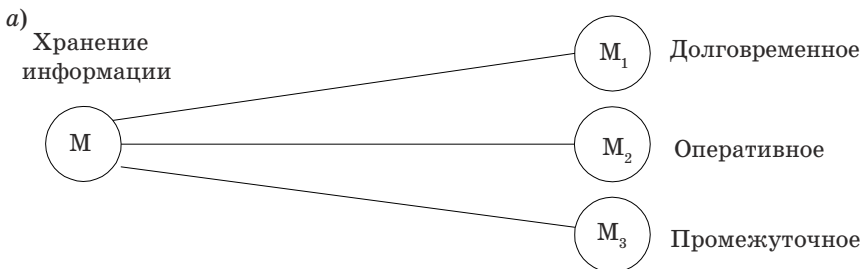
Функции, реализуемые оператором C , представлены на рис. 12.

Закономерность функциональной полноты элементов системы естественно приводит к модульному принципу организации систем. Принцип предполагает построение систем на основе определенного, как правило, функционального полного набора модулей. Благодаря высокой эффективности и экономичности создания и эксплуатации модульных систем этот принцип получил большое развитие в современной практике в создании систем различного назначения.

При создании или СИ конкретной системы выделяется функционально полный набор вещественно-энергетических и организационно-информационных операторов, соответствующий системам рассматриваемого класса. Декомпозиция макрофункций системы производится до уровня микрофункций, соответствующих принятому набору функциональных $\langle PMTC \rangle$ -операторов. Так как методология создания, например, антропогенных систем предусматривает максимальное использование отработанных модулей, заимствованных из систем прототипов, на основе сопоставления обобщенного ДФ систем-прототипов и серийных конструктивных модулей, реализующих соответствующие функции, уточняется набор функциональных операторов системы при принятом уровне декомпозиций.

Операторное представление системы является удобной формой для формирования и преобразования последующих моделей системы. Эквивалентные преобразования операторной модели осуществляются на основе эвристических приемов, базирующихся на диалектическом единстве многофункциональности и специализации в развитии систем.

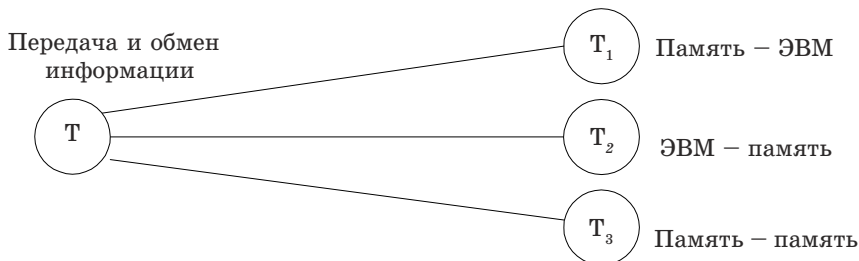
Таким образом, формирование структуры системы осуществляется на основе принципов композиций и декомпозиций (интеграции и дифференциации) функций и структур различных подсистем. Многовековая практика создания различных систем подтверждает, что «новые» решения представляют по существу композицию (декомпозицию) как известных ранее, так и новых (дополнительных) функциональных, конструктивных и организационных модулей.



$$M\{x(t, l, s)\} \rightarrow M\{x(t + \Delta t, l + \Delta l, s + \Delta s)\}$$

при $\Delta t \rightarrow \infty, \Delta l \rightarrow 0, \Delta s \rightarrow 0$

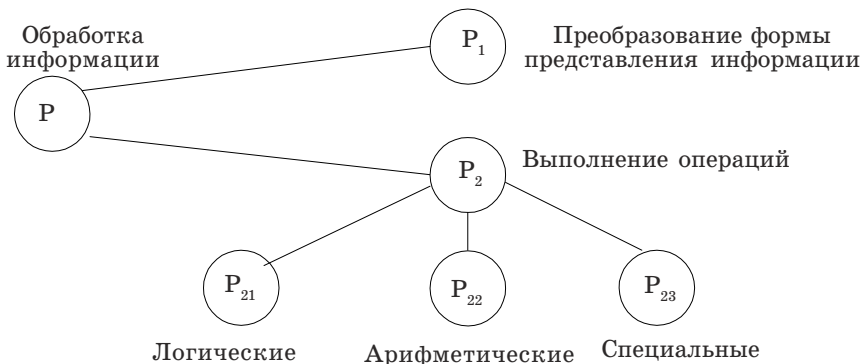
б)



$$T\{x(t, l, s)\} \rightarrow T\{x(t + \Delta t, l + \Delta l, s + \Delta s)\}$$

при $\Delta t \rightarrow 0, \Delta l - \text{const} \neq 0, \Delta s \rightarrow 0$

в)



$$P\{x(t, l, s)\} \rightarrow P\{x(t + \Delta t, l + \Delta l, s + \Delta s)\}$$

при $\Delta t \rightarrow 0, \Delta l \rightarrow 0, \Delta s - \text{const} \neq 0$

Рис. 11. Декомпозиция функциональных операторов <МТР>

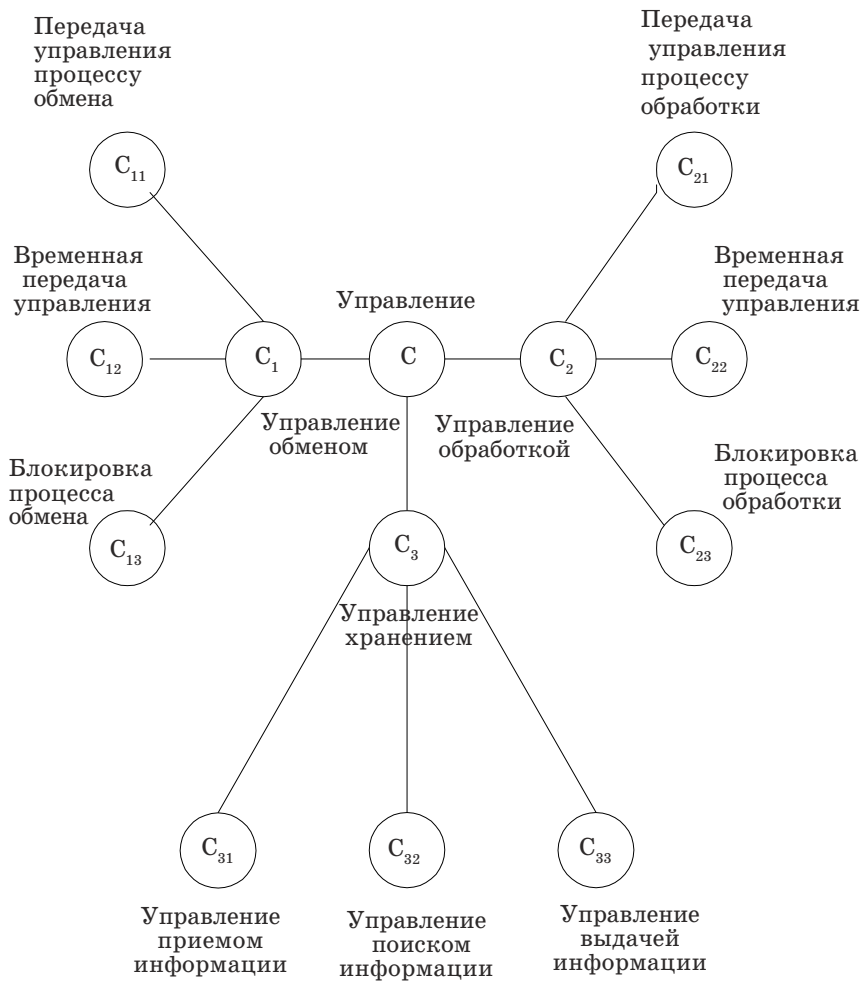


Рис. 12. Декомпозиция оператора управления C

В заключение отметим, что построение ФМ является основой не только для построения математической модели систем, но и для построения соответствующих деревьев противоречий (ДП) и т. д. Соответствующие интерактивные циклы ДЦ ↔ ДФ ↔ ДП ↔ ДК ↔ ДЭ позволяют увеличить степень познания существа системы как средства реализации системы, конкретизировать сами цели и подцели системы, а также повысить степень адекватности модели системы, необходимой для выполнения последующих этапов в СИ, в частности, для синтеза альтернативных вариантов системы.

Естественно, что высокие размерности задач СИ, необходимость выполнения вышеуказанных итеративных процедур для многих вариантов систем обуславливают большие затраты труда и времени, и в этих случаях выручает формируемая наряду с ДФ соответствующая операторная модель системы. При реализации последней в виде прикладного математического обеспечения ЭВМ удастся с использованием ЭВМ существенно повысить экономичность методов СИ при соблюдении и даже повышении процедур СИ. Причем совершенствование математического обеспечения, например в системе автоматизированного проектирования (САПР), решается на основе идей и методов, группируемых по следующим направлениям.

Декомпозиция – деление математической модели исследуемой системы на части и отдельный анализ получающихся частей. Однако отдельный анализ происходит в условиях принятия упрощающих предположений о взаимном влиянии частей, т. е. сопровождается увеличением погрешностей расчетов. Декомпозиция составляет основу блочно-иерархического подхода к проектированию. Это направление широко используют как в автоматизированных, так и в неавтоматизированных методах проектирования.

Диакоптика – направление СИ сложных систем по частям, отличающееся от декомпозиции тем, что отдельный анализ осуществляется без упрощающих предположений о влиянии частей друг на друга. Экономичность диакоптических методов соизмерима с экономичностью обычных декомпозиционных методов, а точность выше.

Учет разреженности матрицы – направление экономичной организации операций над разреженными матрицами. Матрицу называют разреженной, если в ней преобладают нулевые элементы. Отказ от хранения нулевых элементов и реализация алгоритмов, в которых игнорируются арифметические действия над нулевыми элементами, могут дать значительную экономию машиной памяти и времени.

Учет событийности – направление, называемое также учетом временной разреженности моделей и основанное на исключении из

вычислительного процесса действий над неактивными переменными. Неактивной на интервале $\{t, t + \Delta t\}$ переменной называют величину, изменение которой на этом интервале не превышает достаточно малого заранее заданного значения. В моделях сложных систем в каждый момент модельного времени большинство переменных неактивно. Моделирование, основанное на учете событийности, принято называть событийным моделированием. В алгоритмах событийного моделирования необходимо реализовать критерии своевременного включения переменных и соответствующих им частей моделей в группу неактивных (латентных) и своевременного их исключения из этой группы.

Комбинирование моделей и методов – одновременное использование при решении конкретной задачи нескольких разнотипных моделей или методов анализа одинакового целевого назначения. Комбинирование может быть пространственным, если разнотипные модели или методы применяют в разных частях общей модели, или временным, если их применяют на разных этапах вычислительного процесса. Пространственное комбинирование является частным случаем диакоптического подхода, так как подразумевает разделение модели на части (фрагменты). Повышение эффективности при комбинировании моделей и методов основано на использовании наиболее подходящих моделей и методов для данного фрагмента и данного этапа вычислений. Пространственное комбинирование моделей, относящихся к разным иерархическим уровням, называют многоуровневым (или смешанным) моделированием.

Методологические особенности реализации перечисленных методов рассматриваются в [5]. Кроме того, адекватность ДФ и, соответственно, ДЦ, ДП, ДК, ДЭ можно в значительной мере повысить за счет разумной формулировки, постановки задачи в СИ.

ПРОБЛЕМНЫЕ СИТУАЦИИ И ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ

В инженерной и социально-экономической практике обычно рассматривают два пути возникновения задачи: или получают заказ на решение задачи, или на основании собственных наблюдений приходят к убеждению, что нужно искать рациональный способ достижения поставленной задачи. При этом цель может быть изначально известной или может характеризоваться большим числом вариантов (например, проблема развязки дорог), и для ее оценки необходима соответствующая постановка задачи. Часто нет необходимости подробно описывать саму задачу, потому что ее структура достаточно ясна и способ решения определенным образом следует из жизненного опыта. Такие рутинные решения обычно протекают по схеме: инициатива (заказ) — ознакомление с задачей — сравнение с аналогичными и похожими решениями — определение рациональных вариантов.

Для сложных и новых задач с неоднозначными параметрами необходима точная и подробная постановка задачи. В этом случае требуется иметь значительный объем информации, касающийся и целей задач. Необходимо составить представительное множество рациональных вариантов решения и затем выбрать оптимальный вариант с большим или меньшим объемом обработки данных. Этот объем, когда мы имеем дело с неоднозначными параметрами, по крайней мере не меньше, а обычно намного больше, чем при однозначных параметрах. Другие особенности выявляются при наличии дополнительной информации, необходимой в основном для дискретизации множества возможных решений при заданных границах риска, доверительных факторов и т. п.

Если какая-либо естественная дискретизация отсутствует, то она выбирается принимающим решение. Для этого нельзя указать какой-нибудь общий подход. Надежным является итерационный метод. Сначала проводят грубую дискретизацию и постановку задачи в первом приближении. Затем после определения приближенного решения около него формируют ряд более детально дискретизиро-

ванных альтернатив и с большей точностью приближаются к оптимальному.

Таким образом, при постановке задачи в СИ следует принимать во внимание все элементы задачи, такие как состояние исходных данных, возможные варианты решения и их последствия, а также все оказывающие на решение существенное влияние внешние факторы как объективного, так и субъективного характера.

Область влияния ЛПП на процедуру постановки задачи в СИ достаточно велика. Тем не менее варианты постановок задач в СИ определяются, главным образом, параметрами объекта СИ. Факторы, влияющие на принятие решения, занимают диапазон от крайне субъективных, определяемых компетенцией и осведомленностью ЛПП и проявляющихся в ускоренном выборе или затягивании решения, до таких объективных условий, как технические данные, характеристики, модели, методы и всевозможного рода вспомогательные средства.

Наблюдения показывают, что при постановке информационно-технических, социально-экономических или организационно-экономических задач часто исходят, кроме того, просто из интуиции и жизненного опыта. В обыденной практике ЛПП ориентируется лишь на общий, имеющийся у него запас математических знаний. Только относительно немногие процедуры принятия решения полностью математически модулируются и обосновываются. По затраченным для обработки средствам постановки задач в СИ можно разбить на три группы:

- 1) эмпирические и эвристические (неструктуризированные модели задачи);
- 2) опирающиеся на некоторые количественные сравнительные оценки или имитационные (плохо структуризированные модели и задачи см. в гл. IX);
- 3) принятые на основании построения с исчерпывающей полнотой математической оптимизационной модели (хорошо структуризированные модели и задачи см. в гл. VIII).

Величина возможных ошибок находится в обратной зависимости по отношению к степени точности описания задачи и затраченным на выбор решения усилиям и является наибольшей при эмпирических решениях. Процесс принятия решения может быть описан в категориях следующих фаз: инициатива, описание проблемы, анализ ситуации и анализ имеющейся информации, дискретизация и комбинирование внешних условий, постановка задачи.

Процедуры постановок задачи в СИ могут характеризоваться единственной или многими целями. К ориентированным на единствен-

ную цель относятся постановки задач, последствия которых могут быть описаны единственной, например финансовой, категорией параметров, таких как цена, затраты, прибыль или ущерб. При многоцелевых решениях оценить и сравнить отдельные цели в единых универсальных единицах нельзя.

Если, например, для какого-либо прибора имеют значение стоимость изготовления, срок поставки, надежность, простота монтажа, удобство обслуживания и влияние на другие приборы, а указанные свойства будут определяться выбором варианта решения – мы имеем дело с многоцелевым решением. Это требует, как правило, упорядочения ценностей или предпочтений, чтобы взвесить важность частичных целей. ЛПР должен либо получить необходимые для этого объективные сведения, либо субъективно установить их. Так, многомерные цели могут находиться друг с другом в следующих отношениях.

1. Цели взаимно нейтральны. Система или процесс могут применительно к отдельным целям характеризоваться и рассматриваться независимо.

2. Цели кооперируются. Здесь, как правило, систему или процесс удается рассматривать применительно к одной цели, а остальные достигаются одновременно.

3. Цели конкурируют. В этом случае одной из целей можно достигнуть лишь за счет другой.

Если цели частично нейтральны, частично кооперативны, а частично конкурируют между собой, то задача формулируется таким образом, что нужно принимать во внимание только конкурирующие цели. Рассмотрение нейтральных или кооперативных целей не представляет особых трудностей, так что проблемы, ориентированные на множество целей, прежде всего должны быть рассмотрены в части конкурирующих целей, коль скоро все они вместе не могут быть выражены одномерным параметром. Чаще всего это выглядит так, что каждый раз последовательно считают переменной одну из целей и оптимизируют ее, а остальные цели рассматривают как ограничения. Это весьма рациональный метод, в процессе которого одна задача сводится к другой, ориентированной на единственную цель. В общем случае сильные ограничения сужают пространство оптимизации в большей или меньшей степени произвольно. Это нередко может привести к такой ситуации, когда оптимум достигнут не будет и оптимальные варианты решения найти не удастся.

Если отдельные цели удастся расположить в определенном иерархическом порядке (см. гл. I) и благодаря разному весу целей этот

порядок ярко выражен, то можно выбрать лексикографический метод постановки задачи в СИ и ее решения. Причем хотя обычно нельзя категорически указать или однозначно назвать одну доминирующую цель из множества данных, выстраивание целей по ранжиру заранее предполагает наличие метациели. В качестве метациелей рассматриваются максимизация, минимизация или оптимизация в направлении достижения нормированных частных целей оценочной функции рассматриваемой задачи.

При этом используются математические концепции полиоптимизации множеств по Парето и теория нечетких множеств в порядке подготовки к более подробному рассмотрению решения, ориентированных на множество целей. Функция полезности и число реализации решения получаются из конкретных данных о рассматриваемом объекте в СИ. Для ситуации выбора информационно-технических и социально-экономических решений часто характерна неопределенность имеющейся информации. Эта неопределенность вынуждает ЛПР выявить характеристики окружения, которые зависят от различных параметров. Неопределенность имеющейся информации может быть следствием погрешности в определении параметра или собственно неопределенности. Причиной этого могут быть как отклонения, так и ошибки.

Методы решения проблем при постановке задач СИ, связанных с недостатком информации и наличием неопределенностей, подробно рассмотрены в гл. IX. Причем во всех случаях при систематизации подходов и постановке задач СИ рекомендуется оценить возможные модели задач СИ и их внешние условия решения, например, со следующих точек зрения.

- Позволяют ли рассматриваемые подходы выстроить варианты постановок задач СИ и внешние факторы в определенном порядке? Можно ли для этого порядка подобрать количественную шкалу?

- Зависят ли внешние факторы и варианты постановок задач СИ от времени, и если да, лежат ли они в различных временных диапазонах?

- Характеризуются ли они постоянными, целочисленными или не только целочисленными величинами?

- Различна ли продолжительность их действия, так что при известных условиях они действуют в ограниченной мере и через определенное время должны быть заменены новыми?

- Реализуемы ли они детерминированно или речь идет о случайных величинах?

Разумеется, существенную роль могут играть и другие характеристики.

Если внешние состояния известны, а варианты постановок задач СИ необозримы, потому что проблема слишком сложна, можно пойти еще таким путем. Если между зависимыми и независимыми переменными имеется функциональная связь, т. е. возможна в некотором роде детерминистская программа оптимизации, то каждому дискретному значению независимой переменной можно поставить в соответствие значение зависимой переменной. Таким образом определяется пространство допустимых вариантов постановок задач СИ в канонической форме, под которыми принимают двухместный предикат.

«Дано $У$, требуется $Ц$ » (записывается как пара $\langle У; Ц \rangle$), (5)

где $У$ – заданные условия; $Ц$ – цель.

В первом приближении заданные условия $У$ включают: $У^s$ – множество возможных состояний исследуемого объекта; $У^p$ – множество средств, способов, желательно в форме соответствующих операторов, переводящих исследуемый объект из одного состояния в другое. Их можно трактовать как множество отображений подмножеств множества $У^s$ в $У^p$. Цель $Ц$ определяет желаемое состояние объекта: оно не обязательно является единственным и может быть выражено подмножеством состояний или их последовательностью во времени (траекторий в пространстве состояний $У^s$). Решение задачи СИ – достижение цели $Ц$ – обеспечивается выбором соответствующих операторов или последовательности операторов $\langle РМТС \rangle$ над соответствующими ресурсами, средствами, которые переведут объект в требуемое по условию задачи состояние.

Таким образом, проблема и ситуация в СИ связаны с задачей двояко.

Во-первых, даже при их относительно обособленном рассмотрении мы предполагаем либо наличие каких-то неявных условий, гипотетической ситуации, в которой возникает данная проблема, либо наличие неявно поставленной проблемы или «ориентирующей» цели, которая определяет выделение ситуации.

Во-вторых, ситуацию и проблему в СИ можно рассматривать как начальные этапы постановки задачи СИ, в которой они взаимосвязаны посредством заданных условий и цели задачи СИ. Переходным этапом СИ к задаче является проблемная ситуация. Здесь связь обеих частей задачи предстает в самом общем виде. На данном этапе СИ фигурируют еще весьма расплывчатые намерения, не ясна указанная цель, размытые множества факторов, не четко выделенные и согласованные условия. Это скорее гипотеза, в которой взаимно уточняются постановки ситуации и проблемы. От их последующей переформулировки в условия и цель задачи СИ зависит корректность

постановки задачи. Схематически эти переходы в постановке задачи изображены на рис. 13.

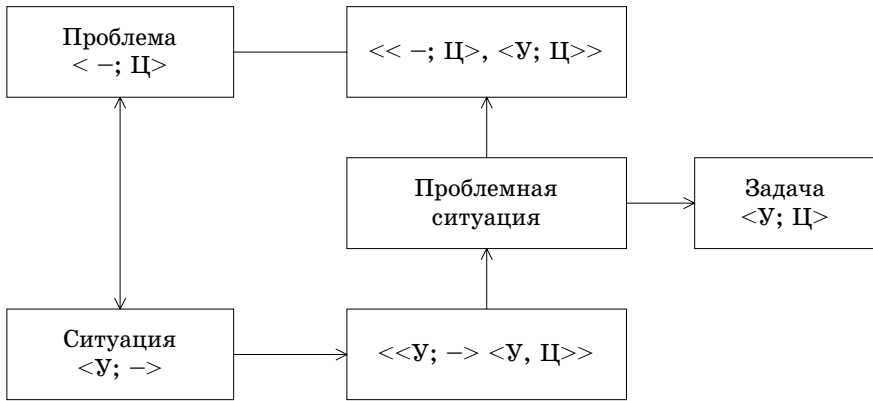


Рис. 13. Схема переходов при постановке задачи СИ

При постановке задачи СИ должно быть обеспечено единство языка, на котором описываются ее компоненты: заданные условия $У$ и цель $Ц$. Иначе не удастся оценить, сопоставить и выбрать варианты решения. Ведь цель $Ц$ образует или характеризует подмножество множества состояний объекта $У$, а это означает, что она должна быть сформулирована в тех понятиях, в каких описываются состояния объекта $У$ для целей СИ.

Обычно каждое определение постановки задачи СИ связано с детализацией или интерпретацией компонент задачи (см. гл. II). Следует иметь в виду, что «состояниями» в $У^s$ могут быть также логические объекты. Например, в логике или математике – это логические переменные (имена, слова), кванторы или числа, символы, математические выражения, геометрические элементы и фигуры и т. п.

Операторы представлены правилами вывода и процедурами построения. Цель задачи СИ может быть сформулирована двояко. В одних случаях следует построить, получить или отождествить объект, отвечающий некоторым критериям – требованиям («задача на нахождение»), в других – доказать по установленным правилам правильность построения или отождествления некоторого объекта («задача на доказательство»). Как правило, формулировка задачи в СИ начинается с определения проблемной ситуации.

В процессе решения задачи СИ имеют дело с неопределенностями трех видов, связанных с наличием следующих множеств: возможных состояний объекта $У^s$, операторов $У^p$ и процедур постановки и

решения задачи, что в существенной мере обуславливает специфику постановки задачи в СИ, а также методов и средств их решения. Поэтому вкратце остановимся далее на специфике формальной структуры социально-экономических задач СИ. При этом, поскольку процедура решения задачи СИ существенно зависит от формулировки и структуры самой задачи, необходимо вновь вернуться к исходной канонической форме задачи (5) и детализировать ее применительно к социально-экономическим задачам СИ.

После того как будет поставлена задача СИ, следует найти путь перехода от условий к цели, т. е. в множестве операторов U^p найти такой оператор или их последовательность, которые переведут объект в желаемое состояние $U^p \in U^s$.

В человеческой деятельности в качестве операторов преобразования выступают определенные системы: технические, производственные, информационные и др., — которые преобразуют исходные ресурсы в продукцию и услуги, удовлетворяющие те или иные потребности. Выбор таких операторов обуславливает создание новых или использование имеющихся систем для решения соответствующих задач, т. е. для достижения поставленных целей. Эти системы называются целереализующими.

Операторы U^p , переводящие логический объект из одного состояния в другое, нельзя отождествлять с процедурами решения задачи.

Множество операторов U^p относится к заданным условиям задачи (5). Процедуры, которые должны обеспечить выбор подмножества операторов и оценку достижения цели Ц, в заданные условия не включены.

Наиболее выпукло это принципиальное различие выступает при разработке плана производства продукции. Заданные условия здесь образуют множество исходных ресурсов (сырье, материалы, рабочее, станки и т. п.) и неуправляемых факторов (условия погоды, квалификация работников и др.), а также множество возможных технологий. Каждая технология, воплощенная в производственной системе, и является «оператором» преобразования ресурсов в конечные продукты. В ответе, полученном в результате решения задачи СИ, т. е. в плане, должна содержаться в явном или неявном виде определенная технология получения продукции. Но вполне очевидно, что она не имеет ничего общего с процедурой разработки самого плана, т. е. решения задачи СИ, с технологией процесса планирования.

Вполне возможно, что объектом задачи СИ является не материальное производство, а производство информации, например проектирование какого-либо изделия. В данном случае технология проектирования также не совпадает с процедурой выбора этой техноло-

гии. Но здесь различие менее заметно, поскольку обе технологии имеют дело с информационными преобразованиями.

Логическое высказывание вида

$$\langle \text{Требуется } \Pi \rangle < - ; \Pi \rangle, \quad (6)$$

где явно не определены заданные условия $У$, называют *проблемой*. Проблема ставится при определенных условиях, хотя и не выраженных явно. Поэтому ее можно рассматривать как неполную постановку задач в СИ и считать, что следующим этапом такой постановки будет распознавание (выявление, конструирование) условий $У$, их отграничение от остального (окружающего) мира. Этот этап выявления условий правомерно рассматривать также в качестве отдельной задачи вида

$$\langle \text{Дано } < - ; \Pi \rangle, \text{ требуется } < У ; \Pi \rangle \rangle. \quad (6a)$$

Логическое высказывание

$$\langle \text{Дано } У \rangle < У ; - \rangle, \quad (7)$$

где явно не определена цель Π , называется *ситуацией*. В обыденном смысле ее часто характеризуют как «обстановку», «совокупность условий», в которых приходится действовать. Однако формулировка ситуации так или иначе, пусть в неявном виде, предполагает наличие цели, в соответствии с которой выделяются элементы $У$. Ситуацию также можно рассматривать как неполную постановку задачи и считать следующим этапом определения цели. Для этого этапа можно сформулировать отдельную задачу

$$\langle \text{Дано } < У ; - \rangle, \text{ требуется } < У ; \Pi \rangle \rangle. \quad (7a)$$

Детализированное определение широкого класса задач СИ, к которому относятся и все социально-экономические задачи, записывается следующим образом:

$$\langle \text{Дано } Z, A, D, Y, U, \text{ требуется } \Pi \rangle; \\ < Z, A, D, Y, U; \Pi \rangle, \quad (8)$$

где Z – множество управляемых входных факторов (начальных условий или входов); A – множество неуправляемых входных факторов (начальных условий или входов), учитываемых в задаче; Y – множество исходов (или конечных результатов), т. е. результатов взаимодействия управляемых и неуправляемых факторов; D – множество операторов d из $Z \times A$ на множестве Y ; содержательно d характеризует сам акт взаимодействия управляемых и неуправляемых факторов, процесс преобразования. С точки зрения управления преобразованием D можно отнести либо к управляемому, либо к неуп-

равляемым факторам, либо разбить на два подмножества – подмножество управляемых операторов D' и подмножество неуправляемых операторов D'' ; $Z \times A$ – декартово произведение множества Z и A , т. е. $Z \times A = \{(z, a) | z \in Z, a \in A\}$; Π – цель выбора подмножества $Y_0 \in Y$ (в частности, Y_0 может состоять из одного элемента) по критерию U ; U – множество критериев оценки элементов множества Y и подмножества Y_0 .

Вышеприведенная постановка задачи является самой общей, исходной. Во многих конкретных случаях возможно объединение некоторых ее компонент либо неполная постановка, не включающая в рассмотрение некоторые компоненты задачи.

Для дальнейшего анализа в СИ удобно сузить и видоизменить постановку задачи, что и делается обычно при разработке соответствующих вариантов постановки задачи, формировании ее модели (модели проблемы, задачи реализации цели, соответствующих критериев эффективности реализации цели задачи), модели принятия (выбора) решений, их оптимизации и т. д.

Проиллюстрируем интерпретацию постановки задач СИ применительно к задаче жилищного строительства. Тогда Y – множество наборов различных видов ресурсов: строительных материалов, механизмов, рабочей силы, денежных средств; каждый набор характеризует один из возможных вариантов наличия этих ресурсов.

Z – множество неуправляемых, но учитываемых факторов, таких как число и состав семей, условия погоды (количество осадков, солнечная радиация и т. п.), сейсмичность и т. п.

D' – набор возможных технологий и проектов строительства жилых домов разных типов.

D'' – обусловленные законами природы «операторы преобразования» и качество (свойства) конструкционных материалов (коррозия, теплопроводность, прочность, звукоизоляция и т. п.), технические и социально-экономические факторы (производительность труда разных категорий рабочих, технологические мощности и производительность строительных машин и механизмов и др.).

D выражает и сам акт взаимодействия «входов» – процесс строительства как таковой. Оператор преобразования можно трактовать как саму реальную систему строительства, на вход которой поступают средства производства и трудовые ресурсы, а на выходе появляются готовые жилые дома.

Y – множество возможных наборов жилых зданий разных типов с их соответствующими характеристиками (число, метраж и планировка квартир, наличие удобств и т. п.).

Π – цель выбора подмножества.

$Y_0 \in Y$ задает требования, предъявляемые к ним: по жилой и полезной площади квартиры на человека, числу комнат на одну семью (разного состава), комплексу удобств.

Тем самым можно сравнивать варианты в множестве Y с позиций требований Π . Критерии U либо непосредственно упорядочивают эти варианты по предпочтению, либо вводят в явном виде правила их оценки, например, выбрать такой вариант Y_0 , который отвечает требованиям Π с минимумом затрат ресурсов Y , или при заданных ресурсах Y в наименьшей степени отклоняется от этих требований, или позволяет достичь их в кратчайший срок. Возможен случай, когда Π прямо задает желаемый выбор жилых зданий и их число, а не требования к их качеству.

Если сравнить формулировки задач (8) и (5), (6), то очевидно, что множества Z , A , Y непосредственно относятся к Y^s , т. е. все они входят в Y . К заданным условиям следует отнести и U , но его природа несколько иная. Заданные критерии явно или неявно выражают цель задачи. Взаимосвязь компонент задачи (7) и их соотношение с компонентами задачи (5), (6) отражены на рис. 14.

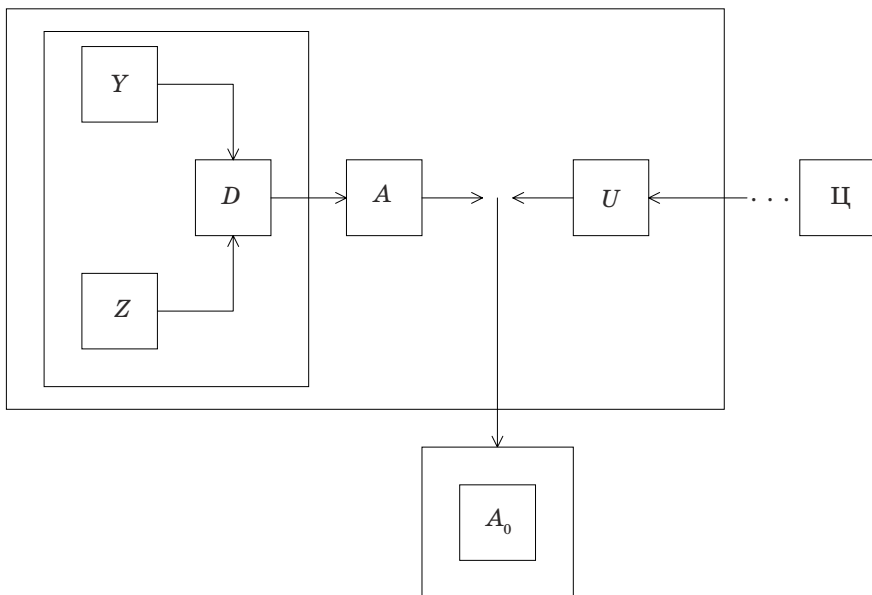


Рис. 14. Структура связей с компонентами задачи

Возможны и другие, более формальные интерпретации компонент задачи (7). Например, элементы множества Z можно рассмат-

ривать как независимые переменные, элементы множества A – как коэффициенты и константы, элементы множества Y – как зависимые переменные, операторы D – как функции или вероятности перехода или операторы других видов.

Для многих задач существенна временная характеристика элементов рассматриваемых множеств. В явном виде она может быть задана распределением во времени элементов этих множеств. Естественно, входы Z , A и их взаимодействие D предшествуют во времени результатам Y_0 . Соответствующие временные характеристики приписываются элементам, например $z(t)$, $a(t)$, $y(t+\tau)$ или $y_1(t+\tau_1)$, $y_2(t+\tau_1+\tau_2)$ и т. д., если не все результаты получаются одновременно. Если время – искомая переменная в задаче, то оно входит в качестве одного из элементов в рассматриваемые множества.

Таким образом, в СИ выбирают оптимальный вариант, который после интерпретации решения и разработки рекомендаций по его использованию передается на реализацию, или в случае, когда все варианты являются неудовлетворительными, возвращаются к начальным этапам СИ для изменения целей, поиска новых альтернатив и уточнения ограничений в их осуществлении.

Строго говоря, указанные этапы СИ нельзя считать их специфической особенностью. Они составляют основу любого аналитического процесса принятия решений, в том числе и методологии СИ. Но в отличие от применения метода исследования операции при использовании СИ совсем не обязательна первоначальная четкая и исчерпывающая постановка проблемы. Эта четкость должна достигаться в процессе СИ и рассматриваться как одна из их главных целей.

Для дальнейшего рассмотрения структуры процесса СИ нам понадобится формализация ключевых понятий («задача», «проблема», «альтернатива», «решение» и др.), характеризующих указанный процесс.

Подробно особенности различных аспектов синтеза операторных моделей средств достижения целей в математическую модель объекта СИ рассматриваются в [5].

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Моделирование в СИ реализует одну из основных кибернетических идей Винера о «черном ящике» – устройстве, о котором известно состояние входов и выходов, но неизвестно внутреннее строение и принцип действия. Винер предлагал следующий способ раскрытия «черного ящика»: рядом с «черным» ставится «белый ящик», с полностью известным и изменяемым в широком диапазоне устройством (рис. 15). На входы обоих ящиков подается одинаковый по свойствам белый шум, а затем устройство белого ящика изменяется до тех пор, пока выходные функции совпадут. С точки зрения исследователя, ящики станут тождественными. Мы говорим «с точки зрения исследователя», поскольку физическое содержание их может быть различным – белый ящик – не копия, а модель черного (допустим, белый ящик построен на электронных, а черный – на механических компонентах).

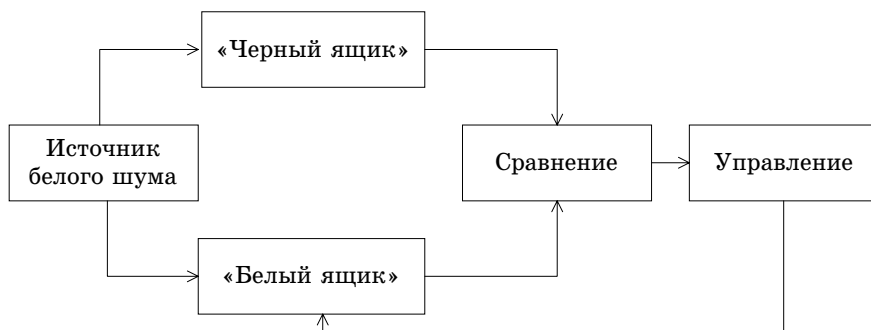


Рис. 15. Схема раскрытия «черного ящика» (эксперимент Винера)

Оперируя сложными системами, нельзя использовать в качестве средства идентификации белый шум. Во-первых, исследуя систему, мы не можем делать с ней все, что пожелаем – систему недопустимо выводить из рабочего диапазона условий. Во-вторых, при создании

новой, реально не существующей системы, сами условия часто плохо известны. В-третьих, применительно к сложным системам трудно определить, что такое «белый шум». Поэтому вместо белого шума берется некоторый ансамбль важных для представления ситуаций внешних воздействий, уточняемый в процессе моделирования.

Тожждественности модели и системы ожидать не приходится, но она не только не нужна, но и вредна, так как будет мешать тому уровню упрощения, который требуется. Поэтому модель может иметь иной физический принцип и, главное, она должна быть «намного проще», но «достаточно хорошо» отражать «интересующие нас свойства» сложной системы. Эти три термина «намного проще», «достаточно хорошо» и «интересующие нас свойства» в системном подходе имеют вполне строгий смысл и количественное представление. Эксперимент Винера позволяет устранить субъективную сложность (незнание), по крайней мере в принципе.

Черный ящик тем «чернее», чем новее по назначению и замыслу вновь создаваемая система. Как показал Тьюринг, при сложности системы выше некоторого уровня ее адекватная (полная) модель не может быть сделана более простой. Это положение является фундаментальным.

Объективно сложные системы не поддаются исследованию с помощью эксперимента Винера. Это — «таинственные ящики», способные целенаправленно перестраивать свою деятельность. Живое существо — типичный пример такой системы. Законы, управляющие поведением таинственного ящика, зависят от ситуации.

В раскрытии таинственных ящиков (рис. 16) моделирование играет выдающуюся роль. Основной задачей является выявление реакций сложной системы на ситуацию и систематизация способов и форм поведения. В силу ограниченных возможностей натурального эксперимента (не говоря уже о допустимости экспериментирования в ряде случаев, например, над человеком) моделирование оказывается единственным средством познания. Кроме того, что чрезвычайно важно, в моделирование можно включить неформальные, эвристические факторы, характерные для человеческого мышления. Строгие теории пока к этому не приспособлены.

Относительно новой, несуществующей системы обычно известны (и то не полностью) входы (определяемые средой) и выходы (определяемые назначением системы). Экспериментировать с такой системой невозможно — ее нет, в нашем распоряжении белый ящик — модель, отражающая замысел, которую и требуется совершенствовать до уровня соответствия заданному назначению. Модель позволяет проверять идеи, выдвигаемые в процессе разработки, методы и

средства их реализации и оценивать предполагаемый результат. Но не только. Модель – это самостоятельная система, хотя и упрощенная. Она уступает теории в общности, зато превосходит ее в конкретности и ясности получаемых данных, целенаправленности; она точнее ориентирует мысли разработчика в том направлении, которое соответствует замыслу. При использовании нескольких моделей с различной целевой ориентацией возникает потребность в интерпретации и согласовании результатов моделирования, что создает предпосылки к объединению моделей и помогает созданию теории. В этом смысле модель является предтечей теории несуществующей системы, заменяя гипотезу и недоступный исследователю эксперимент.

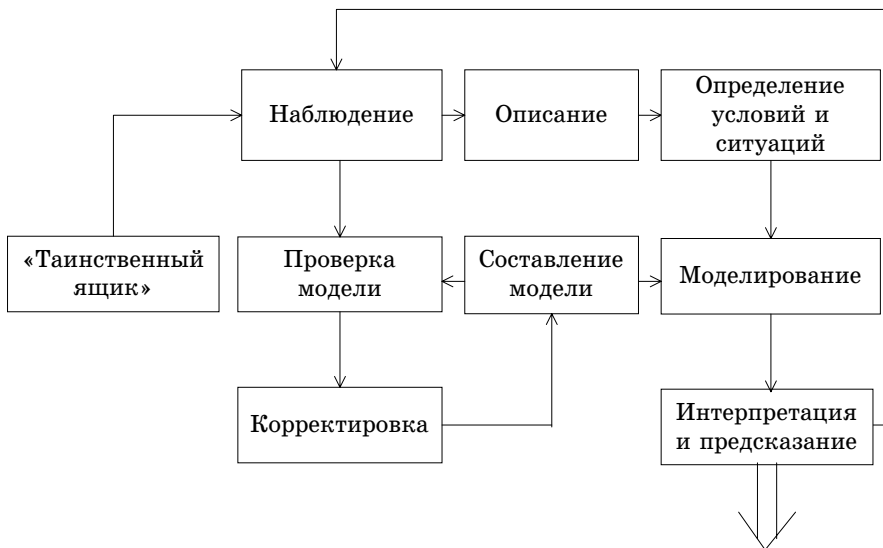


Рис. 16. Схема раскрытия «таинственного ящика»

Концепция системного подхода и СИ состоит в представлении реальных (существующих) или воображаемых (создаваемых) сложных систем посредством упрощенных описаний, т. е. моделей, отражающих определенные, наиболее важные грани сущности сложной системы и исследования таких моделей. Формирование моделей осуществляется на основании тех данных, которые можно получить о сложной системе экспериментальными интеллектуальными средствами. Теория имеет дело с идеализацией реальности, модель – с самой реальностью.

Один из способов СИ состоит в том, чтобы заменить сложную систему [1] несколькими более простыми. Такая подмена неадекват-

на, искусственна и может рассматриваться как сильное упрощение, допустимость которого следует каждый раз проверять. Непосредственной проверки сложная система не допускает, и приходится ориентироваться на процедуры или аналогии – путь сомнительный и редко приводящий к цели.

Изложенные принципы и конкретные наблюдения (измышления) позволяют построить муляж системной модели, который может воспроизвести устройство, но не функции. Мы уже знаем, что для сложных систем знания устройства недостаточно. Такая модель будет мертва, это – скульптура живого, но не живое.

Какими средствами Пигмалиону удалось оживить Галатею, неизвестно, это сделали боги, но с некоторого момента его изделие – материальная модель вымысла – зажило самостоятельной жизнью. Именно это и требуется при создании системной модели. Образовать целостность из некоторого объединения разрозненных компонентов – значит «оживить»; «она еще не родилась, она и музыка и слово, и потому всего живого не нарушаемая связь» (О. Мандельштам).

Исследователь имеет перед собой конкретную проблемную ситуацию или практическую задачу, решение которой связано со следующими трудностями.

Концептуальная. Исследователь только приблизительно знает, чего он хочет добиться, и плохо знает, чего ему следует опасаться.

Гносеологическая. Исследователь, не располагая достаточной информацией, не всегда может получить ее экспериментальным путем, любой эксперимент с реальной системой опасен, так как неизвестно, как он повлияет на систему, возможно, уникальную. Мысленный эксперимент только в редких случаях результативен.

Лингвистическая. Исследователь не имеет единого языка описания системы или проблемы, он почти уверен, что такого языка не существует и что ему не удастся обойтись одним из формальных языков, он должен сам создать единый язык описания системы, преодолев все трудности формализации. Начинать приходится с естественного языка, и здесь – первая ловушка.

Все эти трудности проявляются при создании системной модели. Поэтому поначалу она приближенна, неэффективна и, главное, – мертва. Она лишена целостности и не является системой.

Исследователь должен трезво и критично относиться к созданной им системной модели и знать ее недостатки, уязвимые места лучше, чем достоинства. «Оживление» системной модели возможно одним единственным способом – посредством установления системного гомеостаза. Системный гомеостаз имеет дело со взаимосвязанными про-

цессами, с динамикой. В некоторой системе протекает множество процессов, взаимосвязанных и взаимосогласованных. В телевизоре, например, это процессы приема и усиления сигналов, строчной развертки, кадровой развертки и т. д.

Установление системного гомеостаза дает системе самостоятельность, способность к самоорганизации и развитию дает жизнь. Только в определенной взаимосвязи процессов рождается системный гомеостаз. Но после того как он родился, система обретает самостоятельное существование и самостоятельное поведение. Для того чтобы системная модель работала, т. е. отвечала на поставленные ей вопросы, она должна быть гомеостатичной. Оживление системной модели посредством системного гомеостаза получило название эффекта Пигмалиона.

Поскольку качественные и количественные представления о процессе формирования системного гомеостаза в моделях реальной действительности подробно рассматриваются в [1, 3, 5], где отмечается выгодность использования в первую очередь математической модели, далее подробнее рассмотрим общие методологические особенности их формирования. Но прежде отметим, что с позиций системного подхода *модель* – это такая мысленно (абстрактно) представленная или материально реализованная система, которая, отображая или воспроизводя объект исследования, способна заменить его так, что ее изучение дает новую информацию об объекте – оригинале.

Модель выступает как своеобразный инструмент для познания, который исследователь ставит между собой и объектом и с помощью которого изучает интересующий его объект (рис. 17).

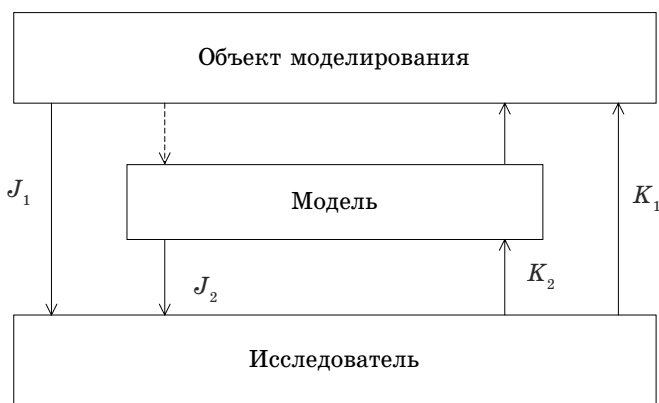


Рис. 17. Схема моделирования: J_1, J_2 – информация; K_1, K_2 – команды

Все множество моделей делится на два больших класса:

- 1) материальные модели (предметные);
- 2) идеальные модели (мысленные, абстрактные).

Материальные модели воплощены в каких-то материальных объектах, имеющих естественное или искусственное происхождение.

Идеальные модели являются продуктом человеческого мышления. Операции с такими моделями осуществляются в сознании человека по схеме созерцание – абстрактное мышление – практика.

В классе материальных (предметных) моделей выделяются две основные группы:

- 1) физические модели;
- 2) предметно-математические модели.

Физические модели представляют собой материальные объекты той же природы, что и объект – оригинал. Этот тип модели широко используется в технике при испытаниях и эксплуатации различных образцов. Например, путем физического моделирования (проведения натуральных испытаний) определяются технико-экономические характеристики экспериментального образца (самолета, автомобиля, ЭВМ и т. д.), и затем результаты испытаний распространяются на все другие экземпляры данного типа. В экономике широко используются эксперименты на отдельных предприятиях для оценки показателей других предприятий данного класса (аэропорты, авиа-ремонтные заводы и т. п.).

Предметно-математические модели являются разновидностью математических моделей. Это модели-аналоги, например, аналоговая машина, которая выступает в качестве модели данного объекта после того, как в нее введена программа (машина «Оптиум-2» моделирует транспортные задачи линейного программирования).

Предметно-математическое программирование основано на том, что характерные черты каких-либо процессов и явлений, принципиально различных по своей физической природе, могут выражаться одинаковыми математическими зависимостями. Все физические системы при некоторых предположениях описываются с помощью обыкновенного линейного неоднородного дифференциального уравнения типа

$$a_n \frac{a^n y}{at^n} + a_{n-1} \frac{a^n y}{at^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{ay}{at} + y = F(t),$$

где $F(t)$ – входной сигнал или внешнее воздействие; y – выходной сигнал (или функция) системы; t – время; a_i – некоторые постоянные.

Класс идеальных (мысленных) моделей объединяет довольно разнообразные модели, различающиеся прежде всего по степени фор-

мализации реальной деятельности. Этот класс включает два основных вида моделей: знаковые и логико-математические.

Знаковые модели являются основным видом идеальных (мысленных) моделей. Они основаны на использовании некоторого формализованного языка (например, алгоритмы, программы для ЭВМ).

Логико-математические модели являются важнейшим видом знаковых моделей, которые выражаются на языке математики и логики. Логико-математическая модель представляет собой определенную систему математических отношений и логических выражений, отражающих существенные свойства исследуемого объекта.

Предметно-математические и логико-математические модели образуют основу *математического моделирования* в широком смысле. Предметно-математические модели служат средством технической реализации логико-математических моделей и, следовательно, предполагают существование последних.

Предметно-математические модели являются специализированными вычислительными устройствами, реализующими определенные логико-математические модели. ЭВМ, по сути, являются предметными математическими моделями для широкого множества объектов.

Мы будем рассматривать здесь только логико-математические модели и называть их *математическими моделями* (ММ).

Отличительной чертой любой системы или модели, в том числе математической, является наличие у нее «входа» и «выхода». Для «входа» существуют такие названия, как причина, стимул, воздействие, возмущение, ресурс, план, команда и т. п. Все эти названия однозначно влияют на то, что определенное изменение входной величины системы влечет за собой некоторые изменения и выходной величины.

Зависимость выходной величины определяется законом поведения системы. В идеальном случае этот закон может быть выражен в виде математического уравнения (ММ), допускающего общее аналитическое решение.

Построение ММ базируется на следующих принципах.

1. *Принцип формирования законов.* Постулируются осуществимые ММ, а из них выделяются законы сложных систем, их подсистем элементов. Согласно данному принципу, теория состоит из гипотез, формализованных в виде ММ. Выводимые из них теоремы (законы) должны допускать возможность проверки соответствия части следствий из них допустимым для эксперимента характеристикам оригинала. Другая часть следствий может быть использована для теоретического прогнозирования соответствующих параметров изучаемой системы.

Таким образом, основным законом сложной системы является ее модель. Остальные законы выводятся в виде теорем. Это подчеркивает, что система, как объект СИ, настолько сложна, а зачастую и уникальна, что может быть изучена только с помощью ММ и моделирования на ЭВМ. С другой стороны, из первого принципа вытекает, что модель сама является сложной или большой системой, отличающейся от оригинала лишь возможностью проведения над ней экспериментов.

2. Принцип рекуррентного объяснения. Свойства системы выделенного уровня объясняются исходя из постулируемых свойств элементов систем непосредственно нижестоящего уровня и связей с ними.

Таким образом, в моделях сложных систем в качестве исходных элементов должны рассматриваться достаточно интегрированные их подсистемы с заданными свойствами и связями между ними. При каждом восхождении на следующий иерархический уровень система предшествующего уровня делается элементом системы следующего уровня.

3. Принцип минимаксного построения моделей. Теория должна состоять из простейших моделей систем нарастающей сложности. Каждая из них должна хотя бы в минимальной степени отражать каждый из нарастающих уровней сложности поведения систем.

Этот принцип является современным кибернетическим вариантом принципа «бритвы Оккама» (не следует делать посредством большего то, чего можно достичь посредством меньшего) и утверждает, что ММ систем должны быть простыми. Несмотря на свою неконструктивность (отсутствие указаний на то, как его реализовать), этот принцип имеет большое значение, ориентируя исследователей на предпочтительность приближенного учета большего числа аспектов поведения систем (факторов) детальному учету меньшего числа факторов.

В СИ при построении моделей сложных систем понятие оптимизационной модели является основным, так как основное свойство сложных систем – наличие цели и необходимость достижения ее экстремальным образом. Формальное задание цели сводится к заданию целевых функционалов для системы и ее модели соответственно. Определение экстремальных значений функционалов является основным содержанием оптимизационных моделей. Относительность сложности системы приводит к понятию иерархии систем и, следовательно, к иерархии целевых функционалов.

Для сложной системы характерно наличие акта решения, т. е. в такой системе должен присутствовать механизм, осуществляющий функции управления.

Реализация только одной цели в каждом контуре управления фактически означает декомпозицию исходной системы и, следова-

тельно, декомпозицию оптимизационной задачи выработки управляющих параметров на подзадачи. В то же время декомпозиция всего процесса управления требует дополнительных средств для координации и согласования решений, вырабатываемых в механизмах, реализующих функции управления.

Ниже приводятся основные требования, предъявляемые к ММ.

Осуществимость. С вероятностью не меньше заданной величины время достижения цели системной ММ, например, время эксперимента с помощью имитационной модели или время выработки рекомендаций по оптимальной структуре, оптимальному поведению системы, не должно превосходить заданного значения времени.

Адекватность. Модель считается адекватной, если отражает заданные свойства объекта или процесса с приемлемой точностью, которая определяется как степень совпадения значений выходных параметров моделей и объекта, процесса, и характеризуется областью адекватности ММ.

Универсальность. При определении области адекватности ММ необходимо выбрать совокупность внешних параметров и совокупность выходных параметров, отражающих учитываемые в модели свойства. Типичными внешними параметрами при этом являются параметры внешних воздействий. Увеличение числа учитываемых внешних факторов расширяет применимость модели, но существенно удорожает работу по определению области адекватности ММ. Выбор совокупности выходных параметров также неоднозначен, однако для большинства объектов число и перечень учитываемых свойств и соответствующих им выходных параметров сравнительно невелики, достаточно стабильны и составляют типовой набор выходных параметров. Если адекватность характеризуется положением и размерами области адекватности ММ, то универсальность модели определяется числом и составом учитываемых в модели внешних и выходных параметров.

Надежность. Надежность ММ оценивается как вероятность получения правильных результатов при использовании метода для решения задач заданного класса. Обычно условия применимости метода связаны с такими характеристиками анализируемых объектов, которые пользователь не может оценить заранее имеющимися в его распоряжении средствами, поэтому возможны ситуации, когда вычислительный процесс оказывается неустойчивым или отсутствует сходимость, что может выражаться в заикливание или останове ЭВМ из-за переполнения разрядной сетки. В САПР стараются применять надежные методы. Однако высоконадежные методы часто

характеризуются недостаточной экономичностью. В этом случае целесообразно комбинирование методов с переходом к трудоемким, но надежным методам только в результате автоматического распознавания ситуаций несходимости или неустойчивости вычислений.

Точность. Погрешности ММ определяются особенностями используемых моделей, численных методов, ограниченностью разрядной сетки ЭВМ. Каждый источник погрешности должен контролироваться с тем, чтобы погрешности не превысили предельно допустимые. Обычно точность результатов, получаемых с помощью численного метода, зависит от некоторых параметров, выбираемых «по умолчанию» или задаваемых среди исходных данных. С помощью этих параметров можно управлять погрешностями решения, но необходимо помнить, что снижение погрешностей возможно лишь до некоторого отличного от нуля предела и, как правило, сопровождается увеличением затрат машинного времени. Целесообразно в математическом обеспечении САПР иметь не один, а несколько методов одинакового целевого назначения, но с различными возможностями компромиссного удовлетворения противоречивых требований точности и экономичности.

Пользователь САПР должен также знать, что явления заикливания вычислений или переполнения разрядной сетки могут происходить не только из-за недостатков выбранного численного метода, но и из-за ошибок в задании исходных данных. Некоторые ошибки, связанные с нарушением формальных правил грамматики входного языка, распознаются автоматически. Однако ряд ошибок не может быть выявлен формальными средствами без участия пользователя, например, ошибки в задании численных значений параметров системы и т. д. Причем эти ошибки могут быть причиной заикливания и переполнения разрядной сетки.

Экономичность. Экономичность модели характеризуется затратами вычислительных ресурсов для ее реализации, а именно затратами машинного времени и памяти. Общие затраты на выполнение какой-либо проектной процедуры зависят как от особенностей выбранных моделей, так и от методов решения.

В большинстве случаев при реализации численного метода происходят многократные обращения к модели элемента, входящего в состав моделируемого объекта. Тогда удобно экономичность модели элемента характеризовать затратами машинного времени, получающегося при обращении к модели, а число обращений к модели должно учитываться при оценке экономичности метода решения.

Экономичность модели по затратам памяти оценивается объемом оперативной памяти, необходимой для реализации модели.

Требования широких областей адекватности, высокой степени универсальности, с одной стороны, и высокой экономичности, с другой, являются противоречивыми. Наилучшее компромиссное удовлетворение этих требований оказывается неодинаковым в различных применениях. Это обстоятельство обуславливает использование при СИ в САПР многих ММ для объектов одного и того же типа.

Перечисленные требования к ММ предопределяют, в свою очередь, такие требования к ним, как максимально возможная простота представления объекта СИ; информационная сложность, т. е. возможность перехода от одной ММ к другой, от объекта к модели и обратно; разумный объем памяти ЭВМ, отводимой для хранения информации о модели; степень разработанности математического аппарата для оперирования с ММ; простота обработки.

Высокая, как правило, размерность систем и задач СИ, необходимость выполнения многих вариантов рассмотрения решения их ММ при СИ обуславливают большие затраты труда, времени, а при использовании для этих целей ЭВМ – их вычислительных ресурсов. Поэтому повышение экономичности методов СИ при соблюдении требований точности является актуальной задачей создания и совершенствования математического моделирования для нужд СИ и соответственно для математического обеспечения САПР. Эти задачи решаются на основе идей и методов, группируемых в несколько направлений (декомпозиция систем и их ММ, диакоптика, учет разреженности матриц, учет событийности и т. д.), которые подробно рассматривались в гл. I, II.

Кроме того, с целью упрощения содержания, структуры ММ в зависимости от сложности системы при ее СИ используют большее или меньшее число уровней абстракции, подобно стратам рассмотрения [1].

Объединение уровней, родственных по характеру использованного математического аппарата, приводит к образованию трех укрупненных уровней: микро-, макро- и метауровней в иерархии функциональных ММ для большинства сложных систем.

На *микроуровне* рассматривается внутреннее состояние или функционирование элемента (подсистемы) системы, обеспечивающее ее взаимодействие с другими элементами (подсистемами) системы. Соответственно используют математические модели элементов (ММЭ), описывающие физическое, информационное, экономическое и т. д. состояние элемента (подсистемы) системы. Для моделирования используют разнообразные совокупности <РМТС>-операторов, а сами уравнения, входящие в ММЭ, называют компонентными. Причем

элементы подсистем, систем могут быть простыми и сложными. Элемент называют простым, если соответствующая ему ММЭ может быть представлена в виде одного линейного уравнения, связывающего, например, переменную типа потенциала U и переменную типа потока I , характеризующие состояние данного элемента системы.

Иногда ММЭ объектов на микроуровне уже в своем исходном виде могут быть представлены в вариационной форме, т. е. в виде задачи минимализации функционала. Типичным примером таких моделей в экономике служат различного рода балансовые модели.

При использовании ЭВМ пользователь или ЛПР средствами входного языка задает исходную информацию о конфигурации проектируемой системы, о способах дискретизации – разделения ее на элементы, о физических свойствах участков системы. Формирование моделей системы, т. е. разделение ее на элементы, выбор ММЭ из заранее составленных библиотек, объединения моделей элементов в общую систему уравнений так же, как и решение получающихся уравнений, осуществляется автоматически на ЭВМ.

На *макроуровне* рассматриваются взаимодействия между элементами (подсистемами) системы, обеспечивающими цельность системы и ее функционирование, взаимодействие с внешней средой, другими системами. На макроуровне производится дискретизация пространств с выделением в качестве элементов отдельных компонентов системы. При этом из числа независимых переменных исключают пространственные координаты. Функциональные модели на макроуровне представляют собой системы алгебраических или обыкновенных дифференциальных уравнений, для их получения и решения используют соответствующие численные методы. В качестве фазовых переменных фигурируют такие, которые характеризуют проявления внешних свойств элементов при их взаимодействии между собой и внешней средой.

Для одного и того же элемента системы на микро- и макроуровнях используют разные ММ. На микроуровне ММ должна отражать внутренние по отношению к системе процессы, протекающие в ней. На макроуровне ММ той же системы служит для отражения только тех ее свойств, которые характеризуют взаимодействие этой системы с другими элементами в составе исследуемой системы.

Математические модели систем (ММС) на макроуровне формируют из ММЭ. Причем наряду с компонентными уравнениями ММЭ обязательно входят уравнения, отражающие способ связи элементов между собой в составе системы и называемые топологическими. Особенностью топологических уравнений является то, что каждое из

них связывает однотипные фазовые переменные, относящиеся к разным элементам системы, тогда как для компонентных уравнений характерно то, что они связывают разнотипные фазовые переменные, относящиеся к одному элементу системы. ММС представляет собой определенную совокупность ММЭ системы при отождествлении переменных, относящихся к соединяемым входам и выходам.

В используемых в САПР методах формирования ММС принято моделируемую систему представлять в виде совокупности однородных подсистем, описывающих процессы определенной природы (физической, информационной, экономической и т. д.). Причем, как правило, для описания одной подсистемы достаточно применять фазовые переменные двух типов – потенциалов и потока.

На *метауровне* рассматривается взаимодействие (функционирование) системы в целом с внешней средой или другими системами. На этом уровне с помощью дальнейшего абстрагирования от характера протекающих внутри системы процессов (например, физических) удастся получить приемлемое по сложности описание информационных процессов, протекающих в анализируемых системах.

Использование общей методики формирования ММ на метауровне оказывается затруднительным из-за чрезмерно больших размерностей задач. Необходимы упрощения. Основой снижения размерности задач является макро моделирование. Часто используют ряд дополнительных упрощений и допущений. Главные из них формулируются следующим образом.

1. Использование вместо фазовых переменных двух типов (например, потенциал – поток) переменных одного типа, называемых сигналами. При этом компонентные уравнения элемента представляют собой уравнения связи сигналов на входах и выходах этого элемента.

2. Однонаправленность в передаче сигналов, т. е. использование макромоделей, в которых отсутствует влияние выходных переменных на состояние входных цепей.

3. Отсутствие влияния нагрузки на параметры и состояние моделируемых систем.

4. Линейность моделей инерционных элементов системы.

При таком функциональном моделировании элементы (явления) систем делят на три группы:

- 1) линейные безынерционные звенья для отображения таких функций, как повторение, инвертирование, чистое запаздывание, идеальное усиление, суммирование сигналов;

2) нелинейные безынерционные звенья для отображения различных нелинейных преобразований сигналов (ограничение, детектирование, модуляция и т. п.);

3) линейные инерционные звенья для выполнения дифференцирования, интегрирования, фильтрации сигналов. Инерционные элементы представляются отношениями преобразованных по Лапласу или Фурье выходных и входных фазовых переменных. При анализе во временной области применяют преобразования Лапласа (модель инерционного элемента с одним входом и одним выходом есть передаточная функция), а при анализе в частотной области – преобразование Фурье (модель элемента есть выражения амплитудно-частотной и частотно-фазовой характеристик). При наличии нескольких входов и выходов ММЭ представляется матрицей передаточных функций или частотных характеристик. Типовая методология построения ММ в СИ приведена в [1].

**ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ
МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ
СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Математическая модель системы – объекта СИ – есть совокупность математических характеристик (чисел, переменных, матриц, множеств, операторов и т. п.) и отношений между ними, которая с требуемой или согласованной точностью отображает интересующие ЛПР свойства и поведение системы.

Математическая модель любого объекта (процесса, явления) включает три группы элементов.

1. Характеристики объекта, которые нужно определить (неизвестные величины), – вектор «выхода» системы

$$y = (y_i), i = \overline{1, n}.$$

2. Характеристики внешних (по отношению к моделируемому объекту) изменяющихся условий – вектор «входа» системы

$$u = (u_j), j = \overline{1, m}.$$

3. Совокупность внутренних параметров объекта – вектор «состояния» системы

$$x = (x_k), k = \overline{1, S}.$$

Математическую модель можно интерпретировать как особый преобразователь внешних условий объекта (входа) u в искомые характеристики объекта (выхода) y . Входы преобразуются в параметры, которые характеризуют результаты проводимых системой операций, в том числе ее воздействие на окружающую среду.

Система преобразует входы и выходы благодаря некоторому отношению причинно-следственного характера (бинарному отношению)

$$uRy \leftrightarrow (u, y) \in R, \quad R \subset uxY.$$

Тогда моделью вход-выход будет тройка

$$S = (u, Y, R).$$

В том случае, когда отношение функциональное, имеем

$$y = F(u) \quad (9)$$

и

$$S = (u, Y, F), \quad (10)$$

где (9) – функциональная модель, а (10) – структурная модель.

Выражения (9) и (10) справедливы в двух случаях:

- 1) система имеет единственное состояние;
- 2) параметры выходов совпадают с параметрами входов.

В более общем случае вход системы определяет параметры ее состояния через отношение

$$uR, x \leftrightarrow (u, x) \in R_1, \quad R \subset uX$$

или через функцию

$$x = F(u).$$

Выход системы в этом случае определяется бинарным отношением

$$(u, x) R_2 y \leftrightarrow ((u, x), y) \in R_2, \\ R_2 C(U \cdot X) \cdot Y$$

или функционалом

$$y = G(u, x).$$

В этом случае модели системы определяются пятерками

$$S = (u, x, y, R_1, R_2)$$

или

$$S = (u, x, y, F, G).$$

С точки зрения системы в целом, ее вход может трактоваться как причина, а ее выход – как следствие. В биологических системах вход обычно называется стимулом, а выход – реакцией. Для технических систем характерно их описание в понятиях вход – состояние – выход (часто выход отождествляется с состоянием). Для организационных и человеко-машинных систем важнейшими понятиями являются цели и задачи. Связь между этими понятиями следующая: результаты решения задач и достижения целей оцениваются в категориях выхода или состояния. Входы должны обеспечивать получение выходов, определяющих достижение целей.

Согласно понятию векторного пространства, множество всех значений, которые может принять вектор входа $u(t)$ в момент времени t , образует пространство входа системы. Аналогично множество всех значений, которые может принять вектор $y(t)$ в момент t , образует пространство выхода системы, и множество всех значений, которое

может принять вектор $x(t)$ в момент t , образует пространство состояний системы.

В любой момент времени t состояние системы является функцией начального состояния $x(t_0)$ и вектора входа $u(t_0, t)$, т. е.

$$x(t) = F[x(t_0); u(t_0, t)], \quad (11)$$

где F — однозначная функция своих аргументов.

Аналогично может быть описан вектор выхода в момент t :

$$y(t) = \Psi[x(t_0); u(t_0, t)]. \quad (12)$$

Уравнения (11) и (12) часто называют уравнениями состояния системы, и для систем, описываемых дифференциальными уравнениями, могут быть записаны в следующей общей форме:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= F[x(t); u(t)]; \\ \dot{y}(t) &= \Psi[x(t); u(t)]. \end{aligned}$$

Для систем, которые являются конечными автоматами, уравнения состояния принимают вид

$$\begin{aligned} x(n) &= F[x(n-1); u(n-1)]; \\ y(n) &= Y[x(n); u(n)]. \end{aligned}$$

Если система описывается линейными дифференциальными уравнениями, то уравнения состояния системы сводятся к следующим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= \mathbf{A}(t)x(t) + \mathbf{D}(t)u(t); \\ \dot{y}(t) &= \mathbf{B}(t)x(t) + \mathbf{G}(t)u(t), \end{aligned} \right\}$$

где $\mathbf{A}(t)$ — матрица коэффициентов; $\mathbf{D}(t)$ — матрица управления; $\mathbf{B}(t)$ — матрица выхода; $\mathbf{G}(t)$ — матрица обхода системы.

Для линейной системы со случайными параметрами уравнения состояния могут быть записаны в виде

$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}(t)x(t) + \mathbf{D}(t)u(t),$$

где матрицы \mathbf{A} и \mathbf{D} являются функциями вектора случайных параметров r .

Вывод уравнений состояния, полностью характеризующих систему, является начальным этапом анализа и синтеза в современной теории управления и менеджмента.

Поведение системы связано с достижением цели или решением задачи. Термин «поведение» будем относить к организационным и человеко-машинным системам, где поведение определяет характер операции, осуществляемой системой. Для технических систем уместно говорить о процессах в системе, а не о ее поведении.

По способам выражения соотношений между внешними условиями, внутренними параметрами и искомыми характеристиками, как было показано выше, ММ делятся на два основных типа: структурные и функциональные.

Структурные модели отражают внутреннюю организацию объекта: его составные части, внутренние параметры, их связи с входом и выходом.

Функциональные модели отражают поведение (функционирование) объекта и обеспечивают познание его сущности через важнейшие проявления этой сущности: деятельность, функционирование, поведение. Внутренняя структура объекта при этом не изучается, а информация о структуре не используется. Абстрактным образом объекта, изучаемого посредством функциональной модели, является черный ящик – объект, структура которого совершенно не видна (см. рис. 15).

Функциональная модель имитирует поведение объекта так, что, задавая значение входа, можно получить значение выхода (без информации о структуре):

$$y = F(x).$$

Построить такую функциональную модель – значит отыскать оператор F , связывающий x и y .

В процедурах, связанных с функциональным аспектом СИ, как правило, используются функциональные ММ, отражающие закономерности процессов функционирования систем. Типичная функциональная ММ представляет собой систему уравнений, описывающих либо физические, либо информационные, либо социально-экономические процессы преобразования, хранения, транспорта и управления этими процессами, т. е. в форме <РМТС>-операторов.

В то же время в процедурах СИ, относящихся к организационному аспекту, преобладает использование ММ, отражающих только структурные свойства системы, например, субординацию или координацию элементов системы, их взаимное пространственно-временное расположение и т. д. Такие модели называют структурными, они чаще всего представляются в виде графов, матриц инценденций и смежности, списков и т. п.

Как правило, функциональные ММ более сложные, поскольку в них отражаются также сведения о структуре системы. Однако при решении многих задач организации систем использование сложных функциональных ММ неоправданно, так как нужные результаты могут быть получены на основе более простых структурных ММ. Функциональные ММ применяют преимущественно на завершаю-

щих этапах верификации описаний систем, предварительно синтезированных, сформированных с помощью структурных ММ.

Следует подчеркнуть, что деление ММ на структурные и функциональные имеет относительный характер. Изучение структурных моделей дает одновременно ценную информацию о поведении объекта, о том, как он реагирует на изменение внешних условий. С другой стороны, при изучении функциональных моделей появляются гипотезы о внутренней структуре объекта (как причины определенного поведения). Тем самым открывается путь для структурно-функционального анализа.

С позиции методологии СИ в экономике и организации производства наиболее сложной системой является организационная система, ММ функционирования которой может быть представлена в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} W &= W(u, x, y, t) \rightarrow \text{extr}; \\ x &= \Phi_1(x^0, u, y, t); \\ y &= \Phi_2(y^0, u, x, t); \\ x^0, x^1 &\in R[x]; u \in R[u]; \\ y^0, y^1 &\in R[y]; t \in [t_0, t_1], \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где W – критерий оптимальности решения; u – отрезок вектор-функции, характеризующий входы системы на интервале $[t_0, t_1]$; x – отрезок вектор-функции, характеризующий состояние системы на интервале $[t_0, t_1]$; $W(\cdot)$, $\Phi_1(\cdot)$, $\Phi_2(\cdot)$ – операторы; $x^0 = x(t_0)$ и $x^1 = x(t_1)$ – начальные и конечные значения x , отвечающие, соответственно, значениям t_0 и t_1 ; $y^0 = y(t_0)$ и $y^1 = y(t_1)$ – начальные и конечные значения y , отвечающие значениям t_0, t_1 соответственно; $R[x]$, $R[u]$, $R[y]$ – ограничения.

Основная задача моделирования с использованием концептуальной модели (13) – получение оптимального плана операции на интервале $[t_0, t_1]$:

$$\pi^* = (u^*[t_0, t_1], x^*[t_0, t_1], y^*[t_0, t_1]),$$

где u^* , x^* , y^* – оптимальные значения вектор-функций на интервале $[t_0, t_1]$.

В качестве операторов $W(\cdot)$, $\Phi_1(\cdot)$, $\Phi_2(\cdot)$ могут быть использованы аналитические функции или другие логико-математические отношения. В зависимости от вида операторов модель (13) может быть стандартной, оптимизационной, имитационной или эвристической.

Если все три оператора $W(\cdot)$, $\Phi_1(\cdot)$, $\Phi_2(\cdot)$ представляют собой аналитические функции и задача одновариантная, то модель (13) – стандартная. В том случае, когда все три оператора – аналитические функции, но задача многовариантная, то модель (13) – оптимизационная. Если же операторы $\Phi_1(\cdot)$, $\Phi_2(\cdot)$ – аналитические функции, а оператор $W(\cdot)$ не имеет аналитического выражения, модель (13) становится имитационной. Наконец, если известно аналитическое выражение хотя бы одного из операторов $\Phi_1(\cdot)$, $\Phi_2(\cdot)$, модель (13) становится эвристической, независимо от того, известна или нет аналитическая форма оператора $W(\cdot)$.

Когда речь идет об операциях, то критерий W и операторы $\Phi_1(\cdot)$, $\Phi_2(\cdot)$, как правило, не имеют формально-математических выражений. Операторы могут представлять собой логически взаимосвязанную систему работ и процедур, отображенную, например, в виде графов, разного рода диаграмм, блок-схем, алгоритмов и т. д.

Построение ММ является одним из основных структурно-логических элементов теории систем, где необходимо руководствоваться следующими требованиями.

1. Математическая модель должна отвечать самым высоким требованиям строгости, эффективности и, следовательно, достоверности полученных выводов.

2. Математическая модель обязана быть адекватной и давать возможность выводить достоверные следствия.

3. Математическая модель должна описывать процесс функционирования системы с достаточной полнотой и быть эволюционной, т. е. иметь способность развития и совершенствования.

4. Степень абстрактности ММ не должна вызывать сомнения в ее полезности для решения практических задач анализа и принятия решений.

5. Математическая модель должна быть ориентирована на применение ЭВМ, реальную информационную базу и должна обеспечивать своевременное получение надежной и достоверной информации для принятия решений с наименьшими затратами средств.

6. При формировании ММ необходимо:

а) определить те свойства объекта, которые должны отражаться моделью (устанавливаются требования к степени универсальности будущей модели);

б) собрать априорную информацию о свойствах моделируемого объекта. Примерами собираемых сведений могут служить справочные данные, ММ, результаты эксплуатации существующих аналогичных объектов и т. п.;

в) сформулировать общий вид уравнений и модели (структуры модели). Этот этап в случае теоретических методов включает выполнение всех присущих этим методам операций, перечисленных выше. Часто проектировщику модели удобнее оперировать не уравнениями, а эквивалентными схемами, с помощью которых инженеру проще устанавливать смысл различных элементов ММ;

г) определить численные значения параметров модели. Возможны следующие приемы выполнения этого требования:

использование специфических расчетных соотношений с учетом собранных сведений;

решение экстремальной задачи, в которой в качестве целевой функции выбирается степень совпадения известных значений выходных параметров объекта с результатами использования модели, а управляемыми параметрами являются параметры модели;

проведение активных и пассивных экспериментов и обработка полученных результатов;

д) оценить точность полученной модели и определить области ее адекватности. При неудовлетворительных точностных оценках выполняют итерационное приближение к желаемому результату повторением выполнения требований в), г), д);

е) представить полученную модель в форме, принятой в используемой библиотеке моделей в САПР и доступной для использования в ЭВМ.

Наличие в методике моделирования эвристических и формальных операций обуславливает целесообразность разработки ММЭ систем, в целом систем в диалоговом режиме работы с ЭВМ. Язык взаимодействия человека с ЭВМ должен позволять оперативный ввод исходной информации о структуре ММ, об известных характеристиках и параметрах системы, о плане экспериментов. Диалоговое моделирование должно иметь программное обеспечение, в котором реализованы алгоритмы статистической обработки результатов экспериментов, расчета выходных параметров эталонных ММ и создаваемых моделей, в том числе расчета параметров по методам планирования экспериментов и регрессионного анализа, алгоритмы методов поиска экстремума, расчета областей адекватности и др. Пользователь, разрабатывающий ММ, может менять уравнения модели, задавать их в аналитической, схемной или табличной форме, обращаться к нужным подпрограммам и тем самым оценивать результаты предпринимаемых действий, приближаясь к получению ММ с требуемыми свойствами.

Для представления моделей используют следующие основные формы.

Инвариантная форма – представление ММ в виде системы уравнений, записанной на общепринятом математическом языке, безотносительно к методу численного решения. Применительно к системам обыкновенных дифференциальных уравнений различают две инвариантные формы – нормальную и общую, определяемые тем, в каком виде – явном или неявном относительно вектора производных – представлена система.

Аналитическая форма – запись ММ в виде результата аналитического решения исходных уравнений модели; обычно модели в аналитической форме представляют собой явные выражения выходных параметров как функций внешних и внутренних параметров.

Алгоритмическая форма – запись соотношений модели и выбранного численного метода решения в форме алгоритмов.

Схемная форма, называемая также *графической* формой, – представление модели на некотором графическом языке, например на языке графов, эквивалентных схем, диаграмм и т. п. Графические формы удобны для восприятия человеком. Использование таких форм возможно при наличии правил однозначного истолкования элементов чертежей и их переводе на язык инвариантных или алгоритмических форм. В качестве примера к представлению модели в схемной форме следует отнести представление модели в виде эквивалентных схем, графов; представление разностных уравнений с помощью шаблонов и т. д.

Модели в алгоритмической и аналитической формах называют, соответственно, алгоритмическими и аналитическими. Среди алгоритмических моделей важный класс составляют имитационные модели, предназначенные для имитации физических или информационных процессов в объекте при задании различных зависимостей входных воздействий во времени. Собственно имитацию данных процессов называют имитационным моделированием. Результат имитационного моделирования – зависимости фазовых переменных в избранных элементах системы от времени.

Ряд форм модели получается при преобразовании ее уравнений на основе формул и требований выбранного численного метода решения. Так, численное решение дифференциальных уравнений в частных и обыкновенных производных требует их предварительно преобразования – дискретизации и алгебраизации. Дискретизация заключается в замене непрерывных независимых переменных (времени и пространственных координат) множеством их дискретных значений.

Алгебраизованная форма – результат представления дифференциальных уравнений в полученных после дискретизации точках в алгебраизованном виде с помощью формул численного интегрирования. Ряд численных методов решения основан на линеаризации исходных уравнений.

Линеаризованная форма – представление уравнений модели в линейном виде. Алгебраизация и линеаризация могут осуществляться по отношению ко всем или только избранным переменным, уравнениям или их частям, что увеличивает разнообразие возможных форм представления модели.

Процесс математического моделирования включает три элемента:

- субъект (исследователь);
- объект СИ;
- модель, опосредствующую отношения познающего субъекта и познаваемого объекта.

Процесс моделирования состоит из четырех этапов (рис. 18).

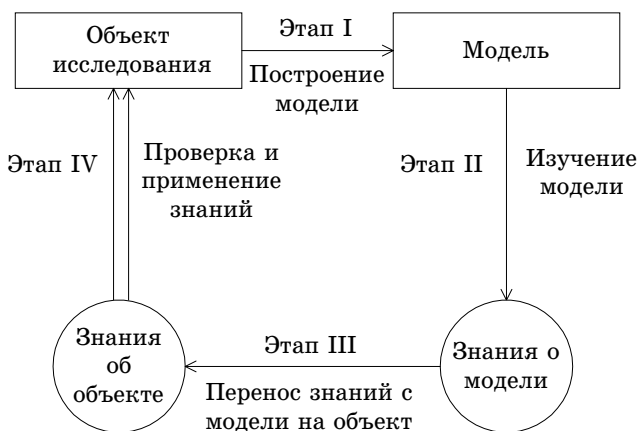


Рис. 18. Общая схема процесса моделирования

Этап I – СИ объекта и постановка задачи моделирования. Главное на этом этапе – четкая формулировка задач, принимаемых ограничений (предпосылок) и вопросов, на которые требуется получить ответы. Важный элемент этого этапа – структуризация задачи, т. е. выделение основных элементов структуры: цели, альтернативных средств, типа модели, критериев и возможных вариантов количественного обоснования решений. На этом же этапе разработчик модели должен согласовать постановку задачи и форму представления информации ЛПР.

Этап II – построение ММ. На этом этапе осуществляется формализация проблемы (задачи), выражение ее в виде конкретных математических зависимостей и отношений (функций, уравнений, неравенств и т. п.). Логическими элементами (этапами) построения ММ являются следующие (рис. 19).

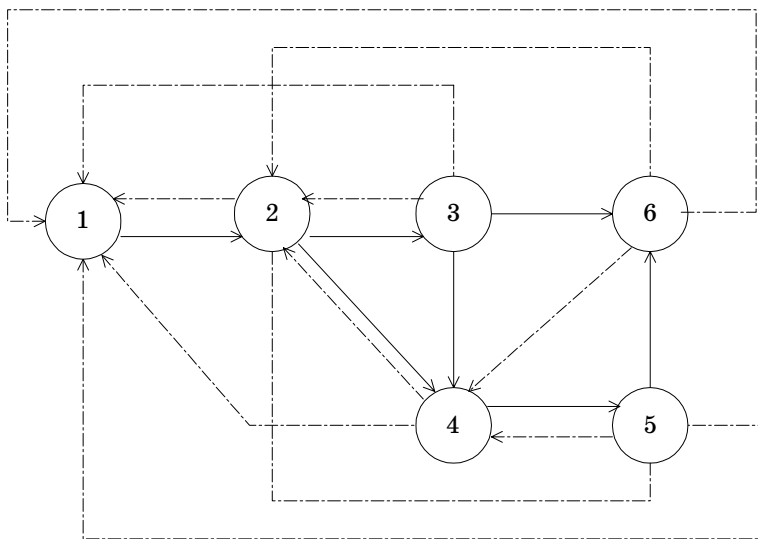


Рис. 19. Связи этапов построения модели:

—————> — последовательные;
 <----- — возвратные (корректировка)

1. *Постановка задачи* моделирования и выделение важнейших свойств моделированного объекта-оригинала с целью определения его гомоморфного образа. Главное здесь – сформулировать гипотезы (хотя бы предварительные), объясняющие поведение и развитие объекта.

2. *Формализация задачи* – выражение ее в виде конкретных математических зависимостей и отношений (функций, уравнений, неравенств и т. д.). Обычно сначала строится основная конструкция (тип) ММ и изучаются возможности ее применения, а затем уточняются детали этой конструкции (конкретный перечень документов и параметров, форма связей).

3. *Математический анализ* модели. Целью этого элемента является выяснение общих свойств модели (ее решений). Здесь применяются чисто математические приемы СИ. Наиболее важный момент –

доказательство существования решений в сформированной модели. Если будет доказано, что решение не существует, необходимо корректировать либо постановку задачи, либо способы ее формализации. В тех случаях, когда сделать это не удастся, переходят к численным методам исследования.

4. *Подготовка исходной информации.* Это наиболее трудоемкий вопрос построения модели. Моделирование предъявляет жесткие требования и к информационному обеспечению. При системном моделировании должна быть обеспечена взаимоувязка информационных потоков.

5. *Численное решение.* Этот этап включает разработку алгоритмов (вычислительных схем) для численного решения задачи на ЭВМ, а также разработку программы. Исследования, проводимые численными методами, для многих задач являются единственно возможными. Особенно важно проведение машинного эксперимента.

6. *Анализ численных результатов и их применение.* На этом заключительном этапе построения модели приходится решать вопросы о качестве и практической ценности построенной модели. Необходимо определить, насколько полно реализованы сформулированные выше требования к ММ.

Первые пять этапов построения ММ (см. рис. 19) являются конкретизацией общей схемы моделирования, изображенной на рис. 18, этапы 1 и 2 соответствуют этапу I общей схемы, а этапы 3, 4, 5 – этапу II общей схемы. Заключительный этап 6 включает этапы III и IV общей схемы (перенос знаний о модели на объект-оригинал, проверка и применение этих знаний).

Конкретные методы построения ММ стандартных (полностью структуризованных), оптимизационных (хорошо структуризованных), имитационных (плохо структуризованных) и эвристических (не структуризованных) рассмотрены в [5, 7]. Отметим лишь, что для формирования и постановки задач СИ на языке математики необходимо обязательно сформировать или выбрать соответствующий критерий эффективности решения этих задач. При практической реализации процесса моделирования конкретных систем необходимо также учитывать специфику предметной области и другие факторы, обусловленные этой спецификой, что подробно рассматривается в [1, 7].

ФОРМИРОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ

Ранее мы подробно рассмотрели содержательное, смысловое значение понятия эффективности и продемонстрировали принципиальную методологию оценки производственной и проектной эффективности систем для целей СИ, не рассматривая особенности конкретных, исторически сложившихся концепций эффективности при оценке полезности систем. Ввиду нарастающей сложности создаваемых человечеством систем учет особенностей концепций эффективности становится определяющим, что обуславливает необходимость хотя бы краткого их рассмотрения.

Исторически в исследованиях эффективности сформировались два относительно самостоятельных направления, первое из которых опирается на телеологическую, а второе — на естественно-научную концепцию. В какой-то мере эти направления альтернативны, хотя оба претендуют на общность, перспективность и практическую применимость.

Первое направление характеризуется функциональным отношением к обоснованию критерия эффективности и способам ее оценки. Оцениваемая система рассматривается с точки зрения надсистемы, а под эффективностью системы понимается то положительное влияние (количественное выражение), которое система оказывает на функционирование надсистемы. Соответственно, критерий и мера эффективности носят функциональный характер. Конкретное содержание оцениваемой системы отходит на второй план, уступая первенство оценке вклада системы в деятельность надсистемы. Функциональные критерии носят нормативный либо вероятностный характер. К первым относятся процент выполнения плана, соответствие дохода на единицу капиталовложений заданному уровню, степень использования основных фондов и т. д.; ко вторым — математическое ожидание успеха, вероятность достижения цели или решения задачи.

Достоинствами функциональных критериев является интуитивная приемлемость, однозначность связи с назначением системы, сопрягаемость с взаимодействующими системами и надсистемой, дос-

таточность оснований для выбора критериев эффективности и его неизменность в ходе разработки, большая свобода в работе, прогнозируемость.

К недостаткам относятся: неизмеримость и плохая определимость критерия; неоднозначность связи с техническими параметрами; зависимость конкретного содержания критерия от условий работы (отсутствие инвариантности); широкий доверительный интервал вычислительной оценки; трудность учета обратных связей; слабая согласуемость критериев взаимодействующих систем; возможная альтернативность критериев, порождающая конфликты.

В качестве примера перечислим функциональные критерии эффективности для систем различного назначения.

1. Для вычислительной системы показатели качества: быстродействие, память, надежность вычислений, стоимость, количество решаемых задач определенного типа в единицу времени, вероятность выполнения заданных функций в надсистеме в течение определенного времени.

2. Для производства (предприятия, отрасли) показатели качества: количество выпускаемой продукции в единицу времени (при соответствующих нормативам характеристиках); надежность; гибкость (вероятность перестройки на новые задачи в определенное время); себестоимость продукции; текущая прибыль, вероятность выполнения нормативных требований к продукции при заданных плане производства и себестоимости; прибыль за определенный промежуток времени; объем продукции высокого качества, выпущенной за определенный промежуток времени; процент выполнения плана.

Второе направление исходит из возможности введения социально-экономического измеримого критерия эффективности. Предполагается, что поскольку взаимодействие между подсистемами внутри системы, а также системы с надсистемой имеет соответствующую социально-экономическую природу (вещественную, энергетическую, информационную, экономическую), следовательно, практически мы имеем дело с измеримыми социально-экономическими величинами. Задача теории эффективности усматривается в обосновании способа обобщения всех факторов взаимодействия с целью доведения (путем последовательной композиции) до единой социально-экономической величины, которая и называется критерием эффективности.

Основопологающим пунктом является социально-экономическая измеримость критерия эффективности, что создает большие преимущества практического характера. Концептуальная трудность состо-

ит в обосновании применимости к системе некоторой социально-экономической теории; она преодолевается посредством создания модели системной метрики, компоненты которой соответствуют таблице ди Бартини [3]. Неизвестная социально-экономическая теория заменяется социально-экономической моделью. Функциональные критерии предполагаются вспомогательными, имеющими ориентационное значение как ввиду искусственности вводимой для них меры, так и ввиду физической (инструментальной) неизмеримости.

Применение социально-экономических критериев имеет существенные преимущества по ряду причин, главной из которых является их большая оперативная сила. В сложных и неопределенных ситуациях, когда требуется принимать ответственные решения, вскрывать и преодолевать противоречия и практические трудности, связанные с нагромождением альтернатив, применение измеримых критериев может дать выдающийся результат. Однако, если модель составлена неудачно, прагматизм социально-экономических критериев может оказаться иллюзорным, а результаты – неверными; такая опасность реально существует и нисколько не уменьшается от обилия удачных примеров. Экспериментальная проверка адекватности модели затруднена уникальностью системы.

«Чисто» социально-экономические критерии имеют следующие достоинства:

измеримость – возможность непосредственной оперативной оценки с помощью методов эконометрии;

инвариантность – независимость от условий работы, области применения и системы отсчета;

однотипность и однообразие для всех подсистем и системы в целом и вытекающая отсюда однотипность описаний;

возможность оперативной оценки целесообразности любых мероприятий и воздействий, направляемых на изменение системы;

применимость при оценке систем с неоднозначной, но вполне определенной и даже неизвестной целевой функцией;

прогнозируемость.

Недостатками социально-экономических критериев являются:

концептуальные и практические трудности обоснования адекватной социально-экономической теории;

трудности в установлении зависимости назначения системы от социально-экономического критерия;

слабая разработанность математического аппарата оценки (опора на измеримость имеет и обратную сторону);

нетрадиционность, непривычность, интуитивная трудность восприятия, отсутствие согласованного мнения по вопросам применения.

В сущности оба направления, несмотря на традиционность первого и естественность второго, страдают общим недостатком – фрагментарностью, поскольку их главным компонентом является передача концептуальной части задачи в другую инстанцию в предположении, что эта другая инстанция обладает большей информацией (первое направление) либо большей компетентностью (второе направление). Высшая инстанция и должна провести метризацию пространства показателей качества и определить критерий эффективности. Иначе говоря, преодоление главной трудности – проблемы, состоящей в том, что различные ее части определены на разных пересекающихся множествах, – возлагается на другую инстанцию, которой поручается составление объединяющего сверхописания.

В этой связи рационален подход, концептуальная основа которого состоит в принципиальном отказе от привлечения каких-либо внешних средств решения проблемы, а проблема оценки эффективности представляет собой саму проблему исследования сложной системы и не может рассматриваться ни как внешняя (связанная с надсистемой), ни как внутренняя. Неполнота исходной постановки проблемы эффективности вытекает только из стремления к упрощению, наглядности и привычности описательных категорий.

Суть подхода состоит в том, чтобы, используя взаимное стимулирование морфологического, функционального и информационного описаний и противоречий между ними, построить модель эффективности, включающую как систему, так и надсистему, а критерий выбрать так, чтобы он был функциональным (т. е. учитывал вклад системы в деятельность надсистемы). В случае успеха коренное противоречие между функциональным и социально-экономическим критериями диалектически разрешается.

Фундаментальными и наиболее общими и употребительными критериями являются время (экономия времени), энергия и энергоинформативность. При этом преобразование одного вида (качества) энергии в другой записывается в виде известного соотношения $E_1 = \eta E$, где E – энергия, η – КПД преобразований, который определяется устройством системы, т. е. в конечном итоге ее внутренней информацией $I : \eta = \eta(I)$.

Эффективность может быть представлена оператором

$$\Theta = \Psi_1(E_1) = \Psi_1(\eta E) = \Psi(I, E).$$

Выбрав соответствующую меру информации, запишем эффективность через оператор от произведения

$$\Theta = \Psi(I \cdot E) = \Psi(\varepsilon), \quad \varepsilon = I \cdot E. \quad (14)$$

Представим оператор в виде многочлена, тогда

$$\begin{aligned} \Theta = & k_1 \times \int_0^{t_0} dt \times \int_0^t \varepsilon(S) dS + k_2 \times \int_0^{t_0} \varepsilon(S) dS + k_3 \times \varepsilon(t_0) + k_4 \times \\ & \times \frac{d}{dt} [\varepsilon(t)]_{t=t_0} + k_5 \times \frac{d^2}{dt^2} [\varepsilon(t)]_{t=t_0} + k_6 \times \frac{d^3}{dt^3} [\varepsilon(t)]_{t=t_0} + \\ & + k_7 \times \frac{d^4}{dt^4} [\varepsilon(t)]_{t=t_0} + k_8 (W). \end{aligned} \quad (15)$$

Поскольку, как показано в [3, 5], все социально-экономические критерии и k_i при использовании системной метрики описываются комбинацией двух величин: длины L и времени T , — то все количественные описания функционирования систем и оценки их эффективности представляют собой диалектику пространство — время. Реализуется эта диалектика соответствующим взаимозависимым изменением L и T , например соотношения (14) примут вид

$$\eta_1 = f_1(L, T); \quad E = f_2(L, T); \quad I = f_3(L, T). \quad (15a)$$

Полученные выражения отражают непосредственно приложение кибернетики к технологии [1]. Очень малым I соответствует сегодняшняя громоздкая и энергоемкая технология. Наоборот, малым E должна соответствовать та самая будущая технология, где источник энергии, машина и материал будут представлять собой единое целое. Эта технология должна основываться на самом главном свойстве материалов как особой форме конденсации вещества — их «антиэнтропийности», одним из проявлений которой является способность к самоупорядочению.

Любой (рациональный) технологический процесс может рассматриваться как передача материалу определенной информации. Чем меньше информации содержит исходный материал, тем больше надо привнести ее на технологической стадии. Это и запечатлено в формуле (14). Конфликты и парадоксы технологии создания систем нередко обусловлены неучетом того, что запас информации даже в простом исходном материале достаточно высок. Кроме того, противоречия между необходимостью эффективной и экономичной реализации определенной совокупности функций и сложностью соответствующей структуры, предназначенной для их реализации, обуславливают взаимосвязь и противоречивый характер показателей каче-

ства деятельности предприятия. Так, улучшение одной группы показателей качества, например, повышение производительности системы, неизбежно приводит к ухудшению других – увеличению потребляемой энергии, усложнению конструкции, снижению надежности.

Разрешение диалектических противоречий при формировании и конструктивном описании критериев эффективности позволяет оптимизировать не только функционирование, но и развитие различных подсистем и систем.

Выражение (15) – самое общее представление эффективности. Возможные упрощения связаны либо с равенством нулю некоторых коэффициентов k_i , либо с независимостью от времени компонентов эффективности. Для систем со стабильной информативностью (энергосистемы: генераторы и канализаторы электроэнергии) $I = \text{const}$ ($\eta = \text{const}$), $\Theta = \Psi(E)$; для систем со стабильной энергетикой (информационные системы: ЭВМ, каналы связи) $E = \text{const}$, $\Theta = \Psi(I)$.

Рассмотрим некоторые типовые системы.

Вычислительные системы:

$$\Theta = aI + bJ - W_0(W), \quad (P \leq P, j \leq j), \quad [\Theta] = [L^5 T^{-4} D^0],$$

где a, b – коэффициенты; W_0 – энергетический эквивалент затрат на содержание $[a] = [L^5 T^{-4} D^0]$, $[b] = [L^5 T^{-3} D^0]$.

Производство (предприятие или отрасль):

$$\Theta = D - W_0, \quad [\Theta] = [L^5 T^{-3} D^0],$$

где $D = \int_0^{t_0} E(t) dt$ – действие; $W_0 = \int_0^{t_0} W(t) dt$ – энергетический эквивалент денежного действия.

Общественные системы:

$$\Theta = D, \quad [\Theta] = [L^5 T^{-3} D^0] \quad \text{либо} \quad \Theta = R = \int_0^{t_0} D(t) dt, \quad [\Theta] = [L^5 T^{-2} D^0].$$

Не представляет труда установить зависимость между функциональными и социально-экономическими критериями эффективности рассмотренных систем. В более сложных случаях рекомендуется сначала найти зависимость функциональных показателей качества от социально-экономических, а затем перейти к критериям эффективности. При этом в исследованиях эффективности сложных систем на этапах их жизненного цикла можно выделить различные направления (страты) СИ [1]. Каждое направление имеет свои методические особенности, которые, в первую очередь, определяются особенностями решаемой задачи, уровнем иерархии объектов СИ, широтой ох-

вата аспектов, учитываемых при исследовании. Причем для каждого из направлений СИ эти категории имеют определенную взаимосвязь: более высокий уровень решаемой задачи, объекта СИ и наибольшая широта охвата аспектов.

Методические особенности системных направлений исследования эффективности объектов СИ проявляются в специфике организационных вопросов, используемых методов и моделей, в постановке и решении прикладных задач. Характер решаемых задач определяет организационные особенности, связанные с распределением работ для получения исходных данных, разработки моделей исследования эффективности и представления рекомендаций по результатам проведенных исследований. Уровень иерархии объектов исследования эффективности определяет характер и уровень моделей, используемых в исследовании. Особенности моделей для разных уровней определяются стремлением получить точную и в то же время достаточно простую модель для соответствующего объекта СИ. Охват учитываемых аспектов обуславливает методы решения задач, свойственных данному научному направлению. Характер методов зависит от степени формализуемости учитываемых аспектов. Например, технический и экономический аспекты могут быть формализованы математическими методами, а для учета социального и политического аспектов могут оказаться более подходящими эвристические методы.

Совмещение, как правило, процессов разработки проекта системы или анализа ее деятельности с проведением исследований их эффективности для принятия соответствующих технико-экономических или социально-экономических, организационных и т. д. решений по разрабатываемому (анализируемому) элементу системы, с учетом его связей с другими подсистемами, частями, элементами системы определяет особенности организации процесса исследования эффективности, используемые при этом методы, а также обобщение и прикладные модели систем и модели их функционирования.

Конкретные примеры принципа отбора системообразующих показателей качества и эффективности подробно рассмотрены в [3].

**СИНТЕЗ МНОЖЕСТВА АЛЬТЕРНАТИВ И
ИХ УПОРЯДОЧЕНИЕ**

Альтернативами в СИ называют варианты (наборы) выбираемых значений управляемых факторов, т. е. пары (y, d') : y принадлежит Y , d' принадлежит D' . Альтернативу обозначают строчной буквой x , множество альтернатив – прописной буквой X .

В детерминированном случае СИ выбор любой альтернативы x , принадлежащей X , ведет к вполне определенному исходу s – элементу множества S . Поэтому ЛПП безразлично, что выбирать – альтернативы или исходы. В таких случаях можно прямо говорить о выборе альтернатив вместо исходов.

Однако на практике следствием выбора альтернативы в СИ чаще всего бывает случайное событие, вероятностные характеристики которого известны. Однозначное соответствие между альтернативами и исходами в таких случаях нарушается. Множество исходов S тогда является множеством исходов случайных событий (z, d) , $z \in Z$, $d \in D''$. Предположим для простоты, что оно конечно. Если обозначить через $P_x(S)$ вероятность исхода s при выборе альтернативы x , то каждой альтернативе $x \in X$ будет соответствовать распределение $F_x(S)$ вероятностей $P_x(S)$ на S . Указанное распределение можно рассматривать как «детерминированный» исход выбора альтернативы $x \in X$, и, как и ранее, $P_x(S)$ может быть отождествлено с x . Возможно также, что и $P_x(S)$ является случайной величиной (поскольку обычно имеют дело не с вероятностью исхода $P_x(S)$, а с ее статистической или субъективной оценкой $P_x(S)$), но этот случай легко сводится к рассматриваемому. Однако для того, чтобы из предпочтения ЛПП на Y получить предпочтение на множестве $\{P_x(S)\}$, необходимо дополнительно знать отношение ЛПП к риску. Появление случайных событий уже не позволяет в полной мере судить о качестве альтернатив на основе лишь предпочтения на множестве конечных исходов. Этот вопрос подробно рассмотрен в гл. X. Здесь же целесообразно предположить, что отношение ЛПП к риску (упорядочение рискованных альтернатив) задано. Такое допущение позволяет как в детерминированном, так и в стохастическом случае не делать раз-

ницы между альтернативами и их исходами и говорить просто о множестве альтернатив.

Наконец, нередко встречается случай, когда вероятности исходов альтернатив неизвестны ЛППР. Если существует возможность проведения экспериментов, то приходят к задаче принятия статистических решений.

Поэтому во всех вышеназванных случаях можно перейти от множества Y к множеству X и говорить в дальнейшем об упорядочении множества альтернатив X .

Наибольшие сложности возникают в тех случаях, когда не существует распределения вероятностей исходов, т. е. когда исходы являются неопределенными событиями нестохастического типа. В этих случаях используют методы теории игр и имитационного моделирования [3, 5].

В практических задачах альтернативы обладают многими свойствами, оказывающими влияние на решение. Пусть некоторое свойство альтернатив из X выражается числом, т. е. существует отображение $\varphi: X \rightarrow E^1$, где E^1 – одномерное пространство (числовая ось). Тогда такое свойство называют критерием, а число $\varphi(x)$ – оценкой альтернативы x по критерию. Одновременный учет отдельных свойств может быть затруднительным. При этом выделяют группы свойств, которые агрегируют в виде аспектов. Аспект представляет собой сложное свойство альтернатив, которое одновременно учитывает все свойства, входящие в соответствующую группу. В частном случае аспект может являться критерием.

Пусть все свойства U_1, \dots, U_n , учитываемые при решении задачи, являются критериями. Поставим в соответствие критерию U_k k -ю ось E^n ($k = 1, n$). Отбросим множество X в E^n , сопоставив каждой альтернативе $x \in X$ точку $\varphi(x) = (\varphi_1(x), \dots, \varphi_n(x))$, где $\varphi_k(x)$ – оценка X по критерию U_k ($k = 1, n$). Критериальным пространством называют n -мерное пространство E^n , координаты точек которого рассматриваются как оценки по соответствующим критериям.

При определении маршрута перевозок альтернативными являются различные маршруты. Диспетчер учитывает следующие свойства: протяженность, загрузку, энергоемкость, безопасность, стоимость, техническое обслуживание и ряд других.

Техническое обслуживание на данном маршруте зависит от числа и расположения станций обслуживания, их мощности, загрузки и сроков выполнения ремонтных работ. Таким образом, техническое обслуживание является аспектом, агрегирующим указанные свойства.

Стоимость маршрута складывается из стоимости топлива, стоимости обслуживания транспортных средств, зарплаты водителей за время пути и других составляющих, т. е. стоимость также является аспектом. Однако возможность вычисления стоимости указывает на то, что данный аспект можно рассматривать как критерий. Протяженность маршрута измеряется в километрах, т. е. выражается числом и поэтому является критерием.

Критерии оценки элементов множества X формулируются на основе цели. Критерии оценки явно определяют требования, которым должны удовлетворять элементы X , чтобы они соответствовали цели. Критерии образуют «мост», перекинутый от цели к условиям задачи с тем, чтобы преодолеть разрыв между Π и $У$. Если располагают процедурой решения, т. е. умеют генерировать элементы $У$ и применять к ним критерии оценки, то в идеальном случае удается преодолеть разрыв выбором одного элемента $x_0 \in X$, а в общем случае — уменьшить этот разрыв выбором $X_0 \subseteq X$, где X_0 — подмножество неразличимых с позиции $У$ и Π альтернатив. При этом важно отметить, что с понятием критерия оценки элементов множества X связано другое важное понятие — функция или оператор выбора.

Функция C ($C: X \rightarrow C(X)$, $C(X) \subseteq X$), отображающая множество альтернатив X в подмножество наиболее предпочтительных альтернатив $C(X)$, называется функцией выбора (ФВ) на X .

Например, пусть K — фиксированное множество непустых подмножеств A . Отображение C , сопоставляющее всякому подмножеству $S \in K$ непустое подмножество $C(S) \subseteq S$, и будет называться ФВ на K .

Критерии оценки (эффективности) альтернатив используются в процедуре упорядочения альтернатив с целью их оценки и выбора наилучшей, принимаемой в качестве решения основной задачи СИ.

Упорядочение альтернатив. Цель задачи Π формирует критерии $У$, операторы ФВ альтернатив C , позволяющие упорядочить элементы множества X .

В частном случае при количественной информации о целевой функции $F(x)$ задача выбора наиболее предпочтительной альтернативы сводится к решению задачи математического программирования или других задач исследования операций:

$$x_0 = C(X) = \arg \max_x (\min) \{(X_i)\}, \quad (16)$$

где C — ФВ оптимального решения; X_i — вектор управляемых параметров i -й альтернативы.

Однако в общем случае, типичном для прикладных задач, такая информация отсутствует, и оператор C представляет собой набор

принципов, неформальных правил, приемов и т. д., которыми пользуется ЛПР.

В случаях, когда не располагают полной информацией о ФВ C или же не располагают средствами для ее формального описания, позволяющего полностью моделировать функцию C на ЭВМ, существование ФВ в виде набора неформальных принципов и правил дает возможность ЛПР различных уровней приходить к согласованному мнению о предпочтительности одной альтернативы перед другой по степени достижения некоторой конечной цели.

Итак, простейшая ситуация, которая позволяет сделать оптимальный выбор из нескольких альтернатив (16), возникает, когда задан один критерий качества, позволяющий сравнивать любые две альтернативы, четко указать, какая из них лучше, и выбрать ту (или те), на которой этот критерий достигает экстремального значения. Однако, как было отмечено выше, в большинстве реальных ситуаций выделить один такой критерий не удастся, более того, часто вообще трудно выделить критерии. Тем не менее для некоторых пар альтернатив можно указать, какая из альтернатив пары лучше (предпочтительнее) другой. В таких случаях говорят, что эти две альтернативы находятся в бинарном отношении. Понятие бинарного отношения позволяет формализовать понятие лучшей альтернативы и операции их попарных сравнений. Указанный математический аппарат рассчитан на использование в условиях, когда отсутствует единое понятие лучшей альтернативы (которое всегда присутствует в математических задачах оптимизации), и позволяет изменить содержание понятия оптимальности в зависимости от условий конкретной задачи. Поэтому математический аппарат бинарных отношений широко используется в СИ. Укажем на некоторые важные свойства бинарных отношений и операций над ними.

Бинарным отношением R на множестве X называется подмножество R множества $X \times X$, т. е. $R \subseteq X \times X$.

Содержательный смысл предложения состоит в том, что задание подмножества R в множестве $X \times X$ определяет, какие пары находятся в отношении R . Это подчеркивается следующим соглашением об обозначениях. Если пара $\langle x, y \rangle$ входит в R , т. е. $\langle x, y \rangle \in R$, то пишут xRy , что читается: « x находится в отношении R с y ».

Здесь и далее $X \times X$ означает декартово произведение множества X на себя, т. е. множество упорядоченных пар (x, y) , где x и y независимо принимают все значения из множества X .

Бинарное отношение может задаваться различными способами: таблицами (матрицами), стрелочными диаграммами (ориентированными графами $G(R/X)$), сечениями.

Покажем использование этих представлений на следующем примере.

Пусть некоторый комплекс работ является совокупностью десяти элементарных работ $x_i, i = 1, 10$. Пусть отношение R на множестве $X = \{x_1, \dots, x_{10}\}$ представляет собой отношение предшествования и следования между парами работ комплекса (отношение порядка). Указанный комплекс работ начинается с выполнения работы x_{10} . Каждая пара (x_i, x_j) означает, что необходимым условием начала работы является x_j .

Совокупность пар $(x_{i1}, x_j), (x_{i2}, x_j), \dots, (x_{ikj}, x_j)$ означает, что работа x_j может начаться только после того, как будут выполнены работы $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ikj}$. Пусть для данного примера подмножество $R \subseteq X, x$ имеет вид

$$R = \{(x_1, x_2), (x_1, x_3), (x_2, x_4), (x_3, x_5), (x_4, x_7), (x_5, x_6), (x_5, x_7), (x_5, x_8), (x_7, x_9), (x_8, x_{10}), (x_8, x_{10})\}.$$

Множество R полностью характеризует комплекс работ с точки зрения последовательности выполнения образующих его работ.

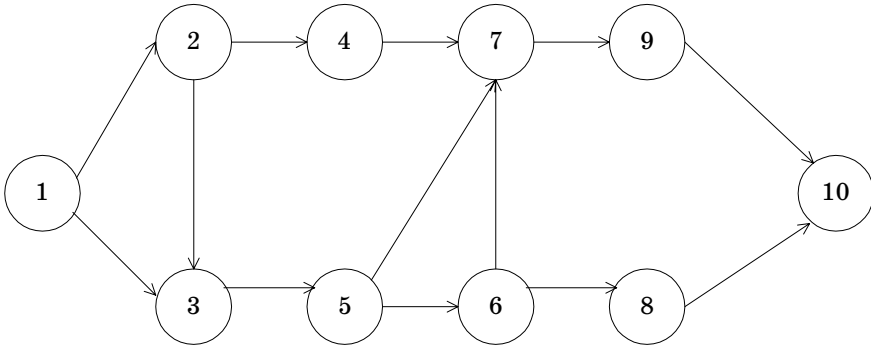
Представим теперь отношение R в виде матрицы. По строкам и столбцам расположим множество $X = \{x_1, \dots, x_{10}\}$. Будем считать, что работы, расположенные по столбцам, составляют первый элемент пары, а по строкам – второй. Проставив единицы в клетки, находящиеся на пересечении пар (x_1, x_j) , образующих отношение R , и заполнив нулями остальные клетки, получим матричное представление отношений (матрица 1).

Матрица 1

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
x_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x_2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x_3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x_4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
x_5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
x_6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
x_7	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
x_8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
x_9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
x_{10}	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0

Представление отношения в виде стрелочной диаграммы или ориентированного графа получим, если работам поставим в соответствие вершины графа, а отношениям между работами – дуги (стрелки) так, чтобы дуги были направлены от предшествующих работ к последующим.

На рис. 20 приведен связный ориентированный граф для данного примера. Эта диаграмма есть не что иное, как сетевой график комплекса работ.



$$\left(\begin{array}{cccccccccc} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 \\ [x_2x_3] & [x_4] & [x_5] & [x_7] & [x_6x_7] & [x_8] & [x_9] & [x_{10}] & [x_{10}] \end{array} \right) \rightarrow \begin{array}{l} x_j \\ \text{сечения} \\ R(x_j) \end{array}$$

Рис. 20. Стрелочное представление бинарных отношений

Матрица 2

	x_1	x_2	x_3	x_4
y_1	0	1	0	1
y_2	0	1	0	1
y_3	1	0	0	1
y_4	1	0	0	1
y_5	0	1	0	1
y_6	0	0	1	1
y_7	0	0	1	1

Сечением $R(x_j)$ бинарного отношения по элементу столбца $x_j \in X$ называется множество всех элементов $x \in X$ в строках таких, что y_jRx (левое сечение) или xRx_j (правое сечение). Очевидно, что множество всех сечений по всем $x_j \in X$ будет третьим представлением бинарного отношения (матрица 2 для y_jRx).

При матричном представлении бинарных отношений между множествами X и Y элементы множества X размещаются по столбцам, а элементы множества Y – по строкам. Наличие отношений между парами элементов отмечается на пересечении строк и столбцов, например, единицей, а отсутствие отношений между элементами – нулем.

При стрелочном представлении бинарных отношений элементы множеств X и Y изображаются точками (вершинами ориентированного графа) (см. рис. 20). Стрелки (направление от x к y , где $x \in X$, $y \in Y$) характеризуют отношение (соответствие) между элементами. Стрелками соединяются все те и только те x и y , для которых $(x, y) \in R$. Элементы пар $x \in X$ и $y \in Y$, которые не удовлетворяют отношению R , т. е. $(x, y) \notin R$, являются несравнимыми и стрелками не соединяются. То же относится к элементам (x_i, x_j) одного множества X , когда $(x_i, x_j) \notin R$ (рис. 21).

Сечением $R(x_i)$ бинарного отношения по элементу $x_i \in X$ называется множество всех $y \in Y$ таких, что $x_i R y$.

Частным случаем бинарного отношения R является функциональное отношение или функция F . Если R – функция, то в ее сечении $R(x)$ существует единственный элемент $y \in Y$ такой, что $x R y$. Этот элемент называется значением функции в точке x и обозначается $F(x)$.

Множество $x \in X$ таких, что существует $F(x)$ (т. е. $R(x)$ не пусто) является областью определения функции. Если функция определена на всем множестве X , ее иногда в этом случае называют отображением. Для обозначения отображения F множества X в множество Y используется запись

$$F : X \rightarrow Y.$$

Следуя работе [5], рассмотрим *свойства бинарных отношений*, позволяющие выделить типы отношений, широко используемые при анализе систем и в процедурах СИ, в частности, при упорядочении и выборе альтернатив.

1. Отношение R является рефлексивным, если $x R x$ для всех $x \in X$, т. е. если оно выполнено между объектом и им самим. На графе $G(X, R)$ рефлексивного отношения каждая вершина $x \in X$ имеет петлю.

2. Отношение R является антирефлексивным, или иррефлексивным, если ни один элемент $x \in X$ не находится в отношении R с

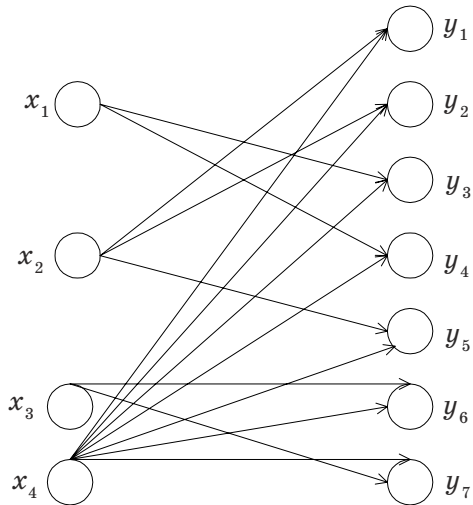


Рис. 21. Пример сечения бинарного отношения по $x_i \in X$

самим собой, т. е. если из соотношения xRy следует, что $x \neq y$ (отношение R может выполняться лишь для несовпадающих объектов). Например, работа y не может начаться, пока не будет завершена работа x .

3. Отношение R называется симметричным, если для любых элементов x и y из множества X из xRy следует yRx . Например, работа x выполнена одновременно (параллельно) с работой y .

4. Отношение R является асимметричным, если отношения xRy и yRx не выполняются одновременно. Например, работа x выполнена раньше работы y .

5. Отношение R является антисимметричным, если xRy и yRx одновременно выполняются в том и только в том случае, когда $x = y$. Например, работа x является частью работы y . Антисимметричное отношение – объединение асимметричного отношения с отношением тождества.

6. Отношение R является транзитивным, если $xRy \wedge yRz \Rightarrow xRz$ для всех $x, y, z \in X$. Например, y является частью x , а z является частью y (z является частью x); работа x технологически предшествует работе y , а y предшествует работе z (работа x предшествует и работе z) и т. д.

Дуга графа $G(X, R)$, соответствующая отношению xRy , называется дугой транзитивного замыкания отношений xRy, yRx .

Через свойства 1–6 можно определить основные типы отношений, которые приведены в табл. 1. При этом знак «+» означает, что данное свойство входит в определение указанного типа отношения.

Таблица 1

Основные типы бинарных отношений

Тип отношений	Свойство					
	Рефлек- сивность	Антиреф- лексив- ность	Симмет- ричность	Асиммет- ричность	Антисим- метрич- ность	Тран- зитив- ность
Эквивалентность	+		+			+
Толерантность	+		+			
Строгий порядок		+		+		+
Квазипорядок	+					+
Нестрогий порядок	+				+	+

Остановимся более подробно на широко используемых отношениях эквивалентности и порядка.

Отношения эквивалентности R на множестве X , имеющие интерпретации: «элементы x и y одинаковы»; «элементы x и y взаимозаменяемы»; «элементы x и y принадлежат одному и тому же классу» и т. п., — определяются тремя свойствами:

- а) каждый объект x эквивалентен самому себе (рефлексивность);
- б) если объект x эквивалентен объекту y , то объект y эквивалентен объекту x (симметричность);

в) если объект x эквивалентен объекту y и объект y эквивалентен объекту z , то объект x эквивалентен объекту z (транзитивность).

Существует и другое, более удобное для приложений определение.

Отношение R на множестве X называется отношением эквивалентности, если оно позволяет получить разбиение S множества X на λ непустых подмножеств (классов) $\{X_1, \dots, X_\rho, X_\lambda\}$ таких, что $X = \lambda$, $\rho = 1 \cup X_\rho$, $X_\rho \cap X_l = \emptyset$, $\rho, l = 1, \lambda, \rho \neq l$, и отношение xRy выполняется лишь в тех случаях, когда элементы x и y принадлежат одному ρ -классу разбиения $S(X)$.

Из этого определения, в частности, видно, что отношение эквивалентности является основной процедурой анализа систем (разбиения целого на части, идентификации объектов и т. д.).

Примеры использования отношений эквивалентности: множество готовых изделий разбивается на сорта (классы качества); множество управленческих задач; множество решений разбивается на подмножества допустимых и недопустимых решений и т. п.

Отношение R на множестве X называется отношением строгого порядка, если оно антирефлексивно, асимметрично и транзитивно.

Выясним особенности графа отношения строгого порядка. Для этого построим граф отношения $x < y$ на множестве $X = \{3; 1; 5; 2; 4\}$ (рис. 22).

Как видно, граф данного отношения не имеет петель и циклов, и любую пару чисел ($x; y$) такую, что $x < y$, соединяет толь-

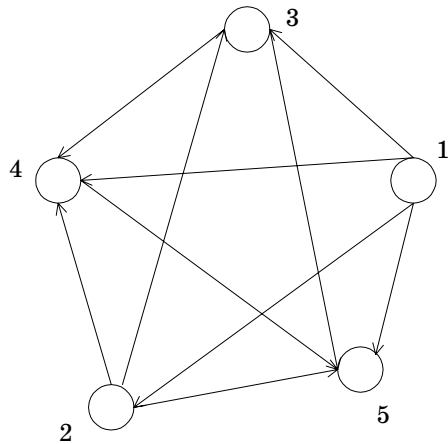


Рис. 22. Граф отношений строгого порядка

ко одна стрелка, идущая от x к y . Если из x идет стрелка в y , а из y в z , то из x идет стрелка в z .

Построенный граф позволяет расположить элементы множества X в таком порядке: число 1, затем число 2 и т. д. Получим множество $X = \{1; 2; 3; 4; 5\}$, про которое говорят, что оно упорядочено отношением $x < y$.

Другие примеры отношений строгого порядка: вариант плана x предпочтительнее варианта y , если все итоговые технико-экономические показатели плана x лучше показателей плана y ; начальник участка подчиняется начальнику цеха – директору производственной единицы, и т. п.

Отношение на R на множестве X называется отношением нестрогого порядка, если оно рефлексивно, антисимметрично и транзитивно.

Такие отношения являются объединениями отношения строгого порядка с отношением тождества. К этому типу принадлежит, например, отношение «не больше».

Множество X , на котором задано отношение порядка R (строгого или нестрогого), называется частично упорядоченным множеством.

Часто говорят также, что в этом случае множество X упорядочено отношением R .

Любые два элемента x и y множества X , частично упорядоченного отношением R , называются сравнимыми, если $xRy \vee yRx$, в противном случае они называются несравнимыми.

Отношение порядка R (строгого и нестрогого) на множестве X называется линейным (совершенным) порядком (упорядочением), если два элемента x и y их множества X сравнимы по отношению R , при этом множество X называется линейно (совершенно, просто) упорядоченным множеством.

Важным для процедур принятия решений являются понятия, выделяющие экстремальные элементы отношений порядка.

Элемент x называется максимальным (минимальным) элементом отношения R , если не существует никакого элемента $y \in X$, для которого $y > x$ ($x > y$).

На графе максимальным элементам соответствуют вершины, не имеющие входящих дуг, минимальным – вершины, не имеющие исходящих дуг. Для отношения строгого порядка множество максимальных элементов совпадает с ядром графа отношений R на X , т. е. указанному соответствует подмножество вершин графа, не имеющих входящих дуг. Примеры максимальных элементов: множество элементов,

оптимальных по Парето, подмножество технологически подготовленных работ («фронт работ») в сетевом графике комплекса работ и т. д.

Элемент x называется наибольшим (наименьшим), если отношение $x > y$ ($y > x$) выполняется для всех $y \in X$, $y \neq x$.

На графе наибольшему элементу соответствует единственная вершина, из которой существует путь в любую вершину графа, исходящий из данной вершины. Примеры: наибольший элемент – корень дерева, описывающего иерархическую структуру подчинения или иерархическую структуру разбиения целого на части (упорядочение по включению \subseteq); наименьший элемент – завершающее событие сетевого графика комплекса работ (например, комплекса научно-исследовательских опытно-конструкторских работ).

Отношением доминирования называется бинарное отношение, обладающее свойствами антирефлексивности и асимметричности.

Говорят, что x доминирует y (записывается $x > y$), если x в каком-либо смысле превосходит y . Так, x может быть проектом, победившим на конкурсе проектов, свойством, которое предпочтительнее свойства y .

Таким образом, отношение строгого порядка является частным случаем отношения доминирования, при котором дополнительно требуется транзитивность. В общем случае для доминирования как транзитивность, так и ацикличность могут не иметь места.

Бинарные отношения порождают на X функцию выбора $C_R(X)$

$$C_R(X) = \{x \in X \mid \forall y \in X x R y\}.$$

Функция выбора $C_R(X)$, порожденная бинарным отношением R , называется предпочтением.

Более подробно вопросы использования отношений порядка при моделировании процедур принятия решений рассматриваются в гл. IX.

Рассмотренная выше теоретико-множественная интерпретация понятий альтернативы и функции выбора C на множестве альтернатив X приводит к следующей общей постановке социально-экономической задачи для целей СИ.

Дано (определено) множество альтернатив X , функция выбора C , требуется найти наиболее предпочтительный (оптимальный в смысле C) элемент $x_0 \in X$, $x_0 > x \forall x \in X$.

Решение x_0 не менее предпочтительно, чем решение x по степени достижения цели, учитываемой функцией выбора C .

Таким образом, задачу выбора можно выразить тройкой

$$\langle X, C, x_0 \rangle. \quad (17)$$

Задачу (17) называют задачей принятия решения или выбора. Таким образом, принятием решения является выбор оптимальной альтернативы x_0 (наиболее предпочтительных альтернатив x_0) из множества рассматриваемых альтернатив X . Под решением (ответом) задачи понимают результат выбора, а акт выбора называют принятием решения.

Если на X определено отношение порядка R , то оптимальным решением x_0 могут быть только те решения $x \in X_0$, для которых не найдется элементов $x \in X$, доминирующих их. Такое подмножество

$$X_0 \subseteq X = \left\{ \tilde{x} \mid \tilde{x} \in X, \nexists x \in X \left(x \underset{R}{>} \tilde{x} \right) \right\},$$

где \nexists – связка «не»; \exists – квантор существования, называется подмножеством максимальных элементов [5]. На графе $G(R, X)$, описывающем структуру $\langle R, X \rangle$ отношений порядка (X – множество вершин, R – множество дуг), множеству максимальных элементов X_0 соответствует множество вершин, не имеющих входящих дуг, – ядро графа $G(R, X)$. Таким образом, получаем следующую формулировку задачи выбора в порядковых шкалах.

Дано множество альтернатив X , функция выбора C , требуется найти подмножество X_0 максимальных элементов множества X с определенным на нем отношением порядка R

$$\langle X, C, X_0 \rangle. \quad (18)$$

Если функцию выбора удастся формализовать в виде алгоритма сравнения значений скалярной функции $F(x)$, т. е. построить отображение множества X на числовую ось так, что

$$x_i \underset{C}{>} x_j \Leftrightarrow F(x_i) > F(x_j) \quad \forall x_i, x_j \in X, \quad (19)$$

то задача (17) формулируется в количественных шкалах.

Дано множество альтернатив X , функция выбора C , требуется найти оптимальное решение x_0 такое, что

$$F(x_0) = \operatorname{extr}_{x \in X} \{ F(x) \}, \quad (20)$$

$$\langle X, \operatorname{extr}_{x \in X} \{ F(x) \}, x_0 \rangle. \quad (21)$$

Количественные шкалы содержат наибольшую информацию и, соответственно, количественные методы и программы для ЭВМ наиболее разработаны для задачи (21), что позволяет решать ее (и, соответственно, задачу (18)) в автоматическом режиме на ЭВМ.

Однако при постановке прикладных задач СИ информацию о целевой функции (19), (20) в количественных шкалах удастся получить лишь в редких случаях, когда для единственного критерия отбора существует естественная количественная шкала. В общем (типичном для социально-экономических задач) случае характерным является наличие многих, притом качественных, критериев отбора. Это вызывает серьезные психологические затруднения у ЛППР при ответе на вопрос, сформулированный в количественной шкале, типа «во сколько раз альтернатива x_i лучше альтернативы x_j ?» Существенно легче получить ответ «да» или «нет» на вопрос в порядковой шкале типа «альтернатива x_i предпочтительнее альтернативы x_j », поскольку именно с решением таких вопросов связана повседневная работа каждого менеджера. Важно отметить следующее.

1. Для решения задачи выбора оптимальной альтернативы x_0 достаточна формализация ФВ C в порядковых шкалах (задача (18)).
2. Для решения задачи (18) в порядковых шкалах применимы комбинированные методы поиска точного решения задачи (21) в количественных шкалах.

Первое утверждение непосредственно следует из постановок задач (18), (21), эквивалентных задаче (17). Второе – из того факта, что все существующие комбинаторные методы решения задач целочисленного программирования (метод ветвей и границ, последовательного анализа вариантов, локальной оптимизации, минимального дерева, оптимальной классификации [6]) так или иначе сводятся к процедурам ветвлений для организации сокращенного перебора на X . На каждом шаге такой процедуры количественная информация о целевой функции $F(x)$ используется лишь для установления доминирования одного решения (подмножества решений) над другим с последующим отбрасыванием худшего варианта. Другими словами, количественная информация в правой части (19) переводится в порядковую (левая часть (19)), которая может быть получена непосредственно из исходных данных задачи (18).

Таким образом, упорядочение вариантов решения (альтернатив) является достаточным условием выбора оптимального варианта. В то же время в порядковых шкалах существенно облегчается сбор исходной информации, и для решения задачи (19) может использоваться обширный арсенал конструктивных методов решения задачи (21).

При отсутствии количественной информации о скалярной целевой функции $F(x)$ (19), (20) эти обстоятельства делают целесообразным более тщательное изучение возможности моделирования процедур принятия решения в порядковых шкалах.

РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Важнейшим элементом СИ, их главной «продукцией» являются управленческие решения. Управление любым видом деятельности менеджмента сводится, в конечном счете, к подготовке, принятию и реализации решений во всех областях их деятельности, направленных на достижение главной цели. От правильности и своевременности управленческих решений зависит эффективность менеджмента и маркетинга.

Решение – один из наиболее необходимых моментов волевого действия. Волевое действие предполагает предварительное осознание цели и средства действия, мысленное обсуждение оснований, говорящих «за» или «против» его выполнения. Этот процесс заканчивается обоснованным выбором наилучшего возможного варианта действия – принятием решения.

Решения, которые принимаются и реализуются в процессе управления (в отличие, например, от инженерных, конструкторских или технологических решений), называются управленческими. Управленческие решения классифицируются по ряду признаков.

В зависимости от того, в какой руководящей инстанции они принимаются, решения бывают высшего, среднего или низшего уровня.

По решаемым задачам различают информационные, организационные и оперативные решения. Информационные решения имеют целью оценить получаемую информацию, ответить на вопрос: «Что правда?» Организационные решения призваны установить необходимую структуру управления, ответить на вопрос: «Каким быть?» Оперативные решения есть решения действия и отвечают на вопрос: «Как действовать?»

По принципам выработки решений они делятся на алгоритмические и эвристические. Обоснование алгоритмических решений производится по определенным правилам – алгоритмам. Эти решения допускают строгую формализацию и рассматриваются в данной главе. Эвристические решения выполняются неформальным, творческим путем без каких-либо строгих правил (см. гл. X).

По методам обоснования решения бывают аналитические, статистические, математического программирования и игровые.

В зависимости от характера исходной информации решения принимают либо в условиях определенности (полная информация), либо в условиях неопределенности (неполная информация).

Выбор наилучших способов действия в условиях неполной информации, недостаточной ясности обстановки – один из наиболее распространенных видов управленческих решений в менеджменте. Принятие решений в неопределенной обстановке связано с неизбежным риском. Сегодня большинство серьезных управленческих решений, сопряженных с риском, не может быть принято интуитивно, исходя лишь из предшествующего опыта и здравого смысла. Попытки выработки решений «на глаз» сплошь и рядом оканчиваются неудачами.

Для выработки наиболее рациональных решений в условиях риска используются научные методы, объединенные общим названием «Исследование операций» [7]. Теорию решений, опирающуюся на эти методы, иногда называют теорией рациональных решений. Вместе с тем для анализа задач, связанных с риском, одних рациональных методов оказывается недостаточно. Наряду с математическими расчетами на принимаемое решение оказывают весьма существенное влияние и обстоятельства, не поддающиеся строгому математическому анализу, например, отношение руководителя к своему выбору. Эти важнейшие, порой, обстоятельства остаются за рамками непосредственных вычислений и относятся к сфере психологии. Поэтому в последнее время совместно с теорией рациональных решений применяют также психологическую теорию решений (см. далее гл. IX).

Если теория рациональных решений отвечает на вопросы: «Какие расчеты обосновывают решение?», «Какие из решений наилучшие?», – то психологическая теория показывает, как люди фактически осуществляют выбор решения той или иной задачи, является ли их поведение при этом рациональным.

Предметом психологической теории решений является анализ деятельности ЛПР. При этом изучаются существенные черты ЛПР, его поведение в процессе подготовки и принятия решения. Поведение человека при принятии решений, особенно сопряженных с риском, в значительной степени определяется структурой задач, требующих решения. Поэтому психологическая теория решений, связанных с риском, уделяет внимание прежде всего анализу таких задач.

Независимо от сложности решаемые задачи с точки зрения психологии имеют некоторые общие черты:

1) каждая задача содержит набор альтернатив, из которых ЛПР должно сделать обоснованный выбор – принять тот или иной вариант решения;

2) каждый вариант решения ведет к определенным последствиям для ЛПР;

3) каждое последствие имеет определенную ценность или полезность для ЛПР.

Психологическая теория решений имеет дело, как правило, с такими ситуациями, в которых большая часть информации не поддается измерению и имеет описательный характер. Ситуации, допускающие формализацию, хорошо анализируются с помощью показанного выше математического аппарата теории статистических решений и других методов СИ операций.

Психологическая теория решений содержит систему общих утверждений – логических предложений о деятельности человека при принятии решений.

Первая группа утверждений описывает то, как у ЛПР возникает представление о задаче, требующей принятия решения. По наблюдению психологов, принимающий решение обычно добивается упрощения поставленной задачи, забывая либо игнорируя при этом некоторые альтернативы или их последствия.

Вторая группа утверждений касается процесса оценки субъективной ценности последствий выбора решения, т. е. его полезности. Одним из возможных утверждений этой группы является представление о том, что полезность выигрыша, например, выраженная в деньгах, характеризуется равным отношением: во столько раз выигрыш больше, во сколько раз он и полезнее. Для ряда практических задач может быть характерно иное, непропорциональное отношение ЛПР к своему возможному выигрышу и проигрышу.

Такая тенденция неизбежно требует формализации процесса принятия решений, против чего у ЛПР традиционно могут возникнуть определенные возражения. Дело в том, что важные решения нередко принимаются опытными людьми, довольно далеко отстоящими от математики, и особенно от ее новых методов, и опасаящимися больше потерять от формализации, чем выиграть. Кроме того, предлагаемые математические методы могут неявно использовать такие методы оценивания, к которым инженеры-экономисты испытывают недоверие. Процесс формализации предполагает известное принуждение, так, что применяющий их ЛПР чувствует, что его лишают свободы решения. Как раз в таких случаях становится неизбежным

отказ от некоторых требований, связанных с существом дела, поскольку отказ от действенных методов может привести к еще большим потерям. Поэтому попытаемся дать проблемам принятия решений обоснованное и наглядное представление с возможно более полным учетом всех имеющихся аспектов. При этом становится очевидным, что адекватная формализация может оказать существенную помощь при решении практических задач. В этой связи рассмотрим основную формальную структуру процесса и процедур принятия решений в задачах СИ.

Процесс принятия решений, как и всякий процесс, в котором участвует человек, имеет объективную и субъективную стороны. *Объективная* сторона процесса существует вне нашего сознания и независима от воли ЛПР. *Субъективная* – отражение объективного в сознании человека (ЛПР). Выработка научно обоснованного решения немыслима без глубоких знаний, творчества и инициативы. Каждое решение должно содержать элемент творчества. Концептуальная модель процесса принятия решения в СИ показана на рис. 23.

Состав «типового» процесса принятия решения включает следующие элементы:

- 1) предварительное формулирование проблемы;
- 2) определение целей операции и выбор соответствующих критериев оптимальности;
- 3) выявление и формулирование дисциплинирующих условий (ограничений);
- 4) составление возможно более полного списка альтернатив и предварительный их анализ с целью отбрасывания явно неэффективных;
- 5) сбор необходимой информации и прогнозирование изменений параметров операции в будущем;
- 6) точное формулирование постановки задачи;
- 7) разработку ММ операции, позволяющей оценивать эффективность каждой альтернативы;
- 8) анализ и выбор метода решения задачи и разработку алгоритма решения;
- 9) оценку альтернатив и определение наиболее эффективных;
- 10) принятие решения, реализацию и оценку результатов.

Поскольку имеется обширная литература по решению оптимизационных задач (см. [7] и библиографию в ней), рассмотрим типовые производственно-экономические задачи при наличии полной информации на следующих примерах.

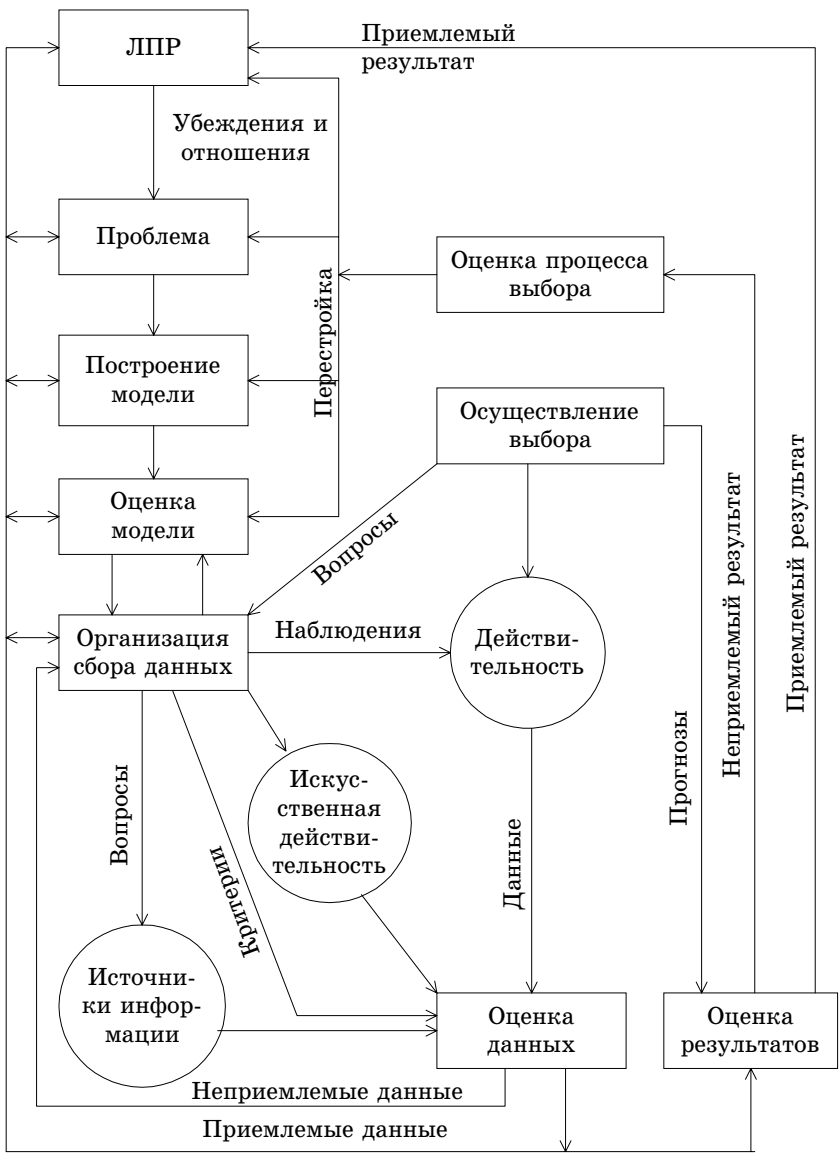


Рис. 23. Концептуальная модель принятия решения

1. Как выработать оптимальный план распределения ресурсов

Основная часть решений производственно-экономических задач связана с распределением ресурсов, комплектующих и т. д. Станки и железнодорожные составы, руда и уголь, прокат и стекло, продукты питания и самый дорогой ресурс – время – все это требует распределения.

Рассмотрим в качестве примера следующую ситуацию. На нескольких складах, расположенных в разных районах региона, находится сырье, которое необходимо по железной дороге доставить на ряд комбинатов. Расстояния от складов до каждого комбината разные, соответственно, различна и стоимость перевозки сырья. Требуется так спланировать доставку сырья на комбинаты, чтобы общая стоимость перевозок была как можно меньше.

Количество сырья, которое необходимо распределить по различным направлениям, обозначим x с соответствующими индексами. Например, x_{A_2} означает массу сырья, распределенного со склада А на комбинат № 2. Поскольку предполагается, что сырье каждого склада будет распределяться между двумя комбинатами без остатка, то данное условие можно записать в виде следующих простых соотношений:

$$50 = x_{A_1} + x_{A_2}, \quad (22)$$

$$30 = x_{B_1} + x_{B_2}, \quad (23)$$

$$20 = x_{B_1} + x_{B_2}. \quad (24)$$

Так как комбинат № 1 способен принять всего 60 тыс. т сырья, а комбинат № 2 – 40 тыс. т, то запишем

$$60 = x_{A_1} + x_{B_1}, \quad (25)$$

$$40 = x_{A_2} + x_{B_2}. \quad (26)$$

Таким образом, имеется пять уравнений с шестью неизвестными, где x_{A_1} , x_{A_2} , x_{B_1} , x_{B_2} , x_{B_1} , x_{B_2} – потребное количество сырья, распределяемого по всем возможным направлениям. Решить эти задачи можно с помощью метода математического программирования или математического планирования.

Казалось бы, довольно просто попытаться перебрать все возможные варианты перевозок по разным направлениям, оценить их стоимость и выбрать путем сравнения самое дешевое сочетание. Но тут возникает совершенно неожиданное препятствие – время. Не то время, которое нужно для перевозки сырья, а время на расчеты всех вариантов перевозок. Число таких вариантов может достигнуть сотен миллионов, а время на расчеты – десятков лет. С такими расчетами не справится в приемлемые сроки даже ЭВМ.

Итак, перебор вариантов не годится. Попробуем распределить сырье с помощью традиционной математики, скажем, составив обычную систему уравнений. Составление этих уравнений большого труда не представляет.

Прежде всего наглядно изобразим схему задачи (рис. 24). На схеме видно, сколько тысяч тонн сырья находится за некоторое время на каждом из трех складов А, Б и В, а также сколько этого сырья потребляют комбинаты № 1 и 2.

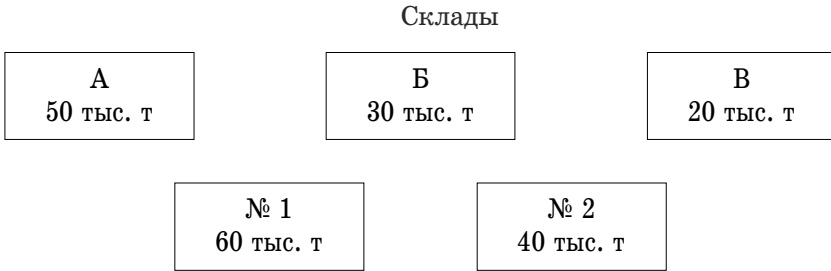


Рис. 24. Предварительное распределение сырья по складам

Зная эти величины, условие оптимальности плана перевозок можно представить так.

$$\begin{aligned} \text{Общие расходы} &= 16x_{A1} + 12x_{A2} + 10x_{B1} + 18x_{B2} + 8x_{B1} + 6x_{B1} = \\ &= \text{наименьшие возможные.} \end{aligned} \quad (27)$$

Для удобства дальнейших расчетов выразим и все шесть иксов через какие-нибудь два, например, x_{B2} и x_{B2} .

Начнем с формулы (23), из которой сразу можно получить

$$x_{B1} = 30 - x_{B2}.$$

Затем из формулы (24)

$$x_{B1} = 20 - x_{B2}.$$

Из формулы (25) с учетом формул (23) и (24)

$$x_{A1} = 60 - (30 - x_{B2}) - (20 - x_{B2}) = 10 + x_{B2} + x_{B2}.$$

Из формулы (26)

$$x_{A1} = 40 - x_{B2} - x_{B2},$$

и, наконец, из формулы (27)

$$\begin{aligned} \text{Общие расходы} &= 16(10 + x_{B2} + x_{B2}) + 12(40 - x_{B2} - x_{B2}) + \\ &+ 10(30 - x_{B2}) + 18x_{B2} + 8(20 - x_{B2}) + \\ &+ 6x_{B2} = \text{наименьшие возможные.} \end{aligned}$$

После раскрытия скобок и приведения подобных членов

Общие расходы = $1100 + 12x_{B2} + 2x_{B2}$ = наименьшие расходы.

Теперь можно выписать все значения иксов, выраженных через x_{B2} и x_{B2} :

$$\left. \begin{aligned} x_{A1} &= 10 + x_{B2} + x_{B2}; \\ x_{B1} &= 30 - x_{B2}; \\ x_{A2} &= 40 - x_{B2} - x_{B2}; \\ x_{B1} &= 20 - x_{B2}. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Таким образом, общие расходы, т. е. $1100 + 12x_{B2} + 2x_{B2}$, будут наименьшими возможными.

План распределения будет оптимальным, если окажутся минимальными суммарные затраты на все перевозки. Стоимость перевозки сырья (в тыс. р.) по любому из направлений известна.

Это и есть ММ оптимального плана распределения сырья по комбинатам. Она показывает, как должны распределяться перевозки по маршрутам, чтобы все сырье оказалось на комбинатах при наименьших транспортных расходах. Представим ее наглядно в виде графика (рис. 25). Основная задача построения будет заключаться в том, чтобы очертить на графике некоторую область, в пределах которой может существовать план, при котором все перевозки будут положительными. В качестве координатных осей выберем x_{B2} и x_{B2} , что дает возможность построить на графике все уравнения плана. Приравняем первое из уравнений (28) к нулю:

$$x_{A1} = 10 + x_{B2} + x_{B2} = 0 \quad \text{или} \quad x_{B2} = -x_{B2} - 10.$$

Тогда линия, соответствующая на графике этому выражению, может быть построена по точкам: при $x_{B2} = 0$, $x_{B2} = -10$ и при $x_{B2} = -10$, $x_{B2} = 0$.

Линия, соответствующая $x_{A1} = 0$, отсекает на графике полуплоскость (заштрихована), в пределах которой находятся все допустимые планом значения x_{A1} . Линии $x_{B1} = 0$, $x_{B1} = 0$, $x_{A2} = 0$ также ограничивают на графике полуплоскости, соответствующие плану. Еще две полуплоскости отбиваются на графике координатными осями: абсцисс ($x_{B2} = 0$) и ординат ($x_{B2} = 0$).

В результате всех этих построений на графике образуется замкнутая область – многоугольник *ОАВВГ*, каждая точка которого отвечает

Склад	Комбинат	
	№ 1	№ 2
А	16	12
Б	10	18
В	8	6

требованию плана о положительности перевозок (линия x_{A1} , правда, выпадает из этой области, но условие при этом не нарушается).

Полученная площадь называется областью допустимых планов. В какой же ее точке будет не только допустимый, но и оптимальный план? Для ответа на этот вопрос покажем на графике последнее из выражений (28), содержащее условие наилучшего из возможных планов. Это выражение (обозначим его L) может быть представлено семейством параллельных прямых, имеющих наклон влево от оси координат. Причем чем больше величина свободного члена этого выражения, тем больше вправо сдвинут его график. Так, например, при $L = 1100$ график будет проходить через точку O , при $L = 1380$ – через точку A , при $L = 1480$ – через точку B .

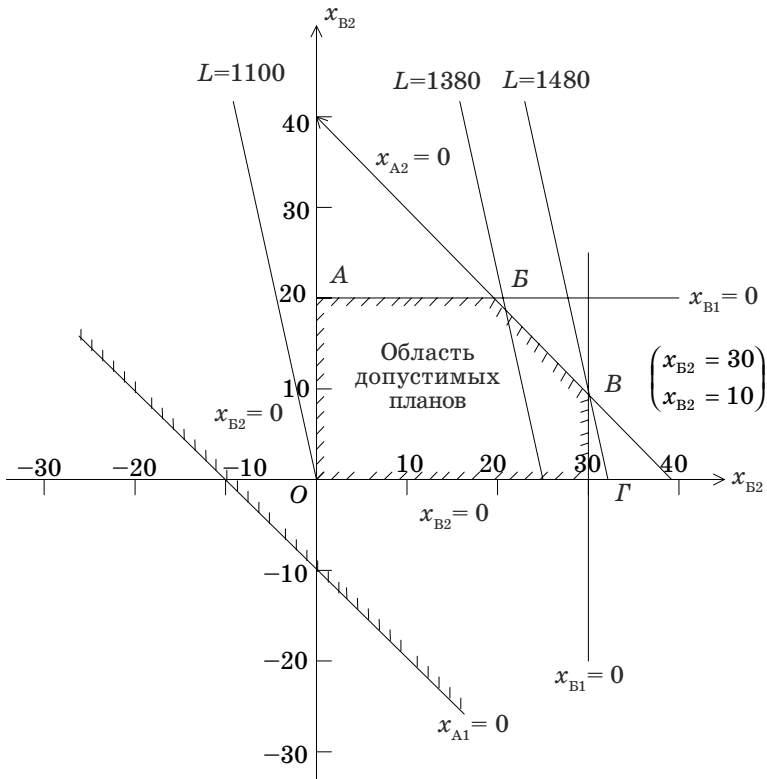


Рис. 25. Определение областей существования плана

Ключевым условием построения оптимального плана является то, что он должен одновременно соответствовать: 1) области оптимальных планов и 2) тому из графиков, при котором L принимает наименьшее значение. Из рисунка видно, что этим требованиям отвечает единственное место в области допустимых планов – точка O . Действительно, какую бы другую точку в этой области мы ни взяли, общих расходов L будет заведомо больше.

Итак, найденный оптимальный план означает требование следующих объемов перевозок (в тыс. т) по разным направлениям: $x_{A1} = 10$, $x_{A2} = 40$, $x_{B1} = 0$, $x_{B2} = 20$, $x_{B3} = 0$. При этом общие расходы будут составлять $1100 + 12 \times 0 + 2 \times 0 = 1100$ тыс. р. Этот план показан на рис. 26.

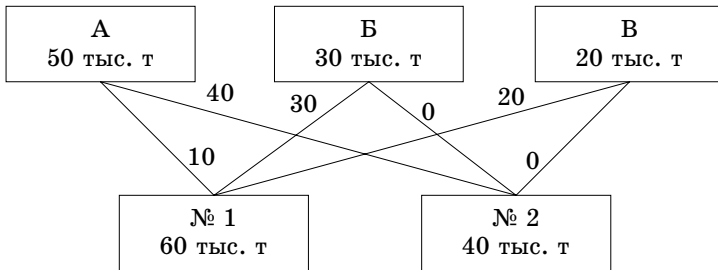


Рис. 26. Схема оптимального плана распределения ресурсов

На первый взгляд может показаться, что такой план легко составить и без каких-либо расчетов, просто на глаз. Однако это не так. Для примера попробуем прикинуть глазомерный план, руководствуясь соображением насыщения каждого комбината сырьем с какого-нибудь одного склада (так часто и поступают). Вначале передадим со склада А все сырье на комбинат №1, затем все сырье комбината Б отправим на склад №2, а нехватку сырья на комбинатах дополним за счет склада В, т. е. $x_{A1} = 50$, $x_{A2} = 0$, $x_{B1} = 0$, $x_{B2} = 30$, $x_{B3} = 10$, $x_{B2} = 10$.

Казалось бы, ну чем не план: все склады передали свое сырье комбинатам. Между тем на графике ясно видно, что данному плану соответствует точка В в области допустимых планов. И расходы при этом будут самые большие из всех возможных – ведь это крайнее возможное положение линии L . Общая величина их составит: $L = 1100 + 12 \times 30 + 2 \times 10 = 1480$ тыс. р., что на 380 тыс. р. больше, чем при оптимальном плане.

Математическое программирование является единственным эффективным средством решения не только транспортных задач, но и проблем распределения оборудования, денежных средств, других ресурсов.

2. Как экономично распределить оборудование

Представим себе группу из трех станков, каждый из которых может производить два типа деталей, условно А и Б. Производительность каждого из станков по разным типам деталей, как правило, различна: станок № 1 производит в одну минуту 5 деталей А или 5 деталей Б, станок № 2 – 6 деталей А или 2 детали Б, станок № 3 – 5 деталей А или 3 детали Б. При решении задачи необходимо учитывать два ограничения:

- 1) ни один из станков не должен простаивать;
- 2) продукция должна быть комплектна: количество производственных деталей А должно равняться числу деталей Б.

Прежде всего попытаемся получить примерное решение задачи. Все расчеты будем производить исходя из общей продолжительности времени работы 6 ч = 360 мин (одна смена).

На все указанное время загрузим станок № 1 деталями А, а станки № 2 и 3 – деталями Б. Результат такого решения изобразим следующим образом: слева покажем время загрузки станков по различным деталям, а справа – соответствующее количество произведенной продукции (произведение времени работы на минутную производительность):

Станок	Время загрузки, мин, по деталям		Деталь, шт.	
	А	Б	А	Б
№ 1	360	0	1800	0
№ 2	0	360	0	720
№ 3	0	360	0	1080

Общее количество выпущенной продукции составит $1800 + 1800 = 3600$ деталей. Это решение отвечает поставленным условиям: во-первых, все станки полностью загружены в течение рабочего времени, во-вторых, количество произведенных деталей А точно равно числу полученных деталей Б. Однако является ли это решение наилучшим, нельзя ли добиться большей производительности в данных условиях? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо обратиться к методу математического программирования.

Решение задачи представим в виде графика (рис. 27). Заштрихованный многоугольник *ОАВСД* соответствует условиям задачи и представляет собой область допустимых планов распределения времени работы станков № 2 и 3 по изготовлению детали А. На соответствующую

щих осях графика отмечена продолжительность работы этих станков. (В расчетах вполне можно обойтись двумя станками и одной деталью, так как по этим данным легко рассчитать и все остальные.)

Любая точка заштрихованной области допустимых планов, как видно из ее названия, представляет какой-либо один возможный план, отвечающий принятым ограничениям. Так, например, точка *O* соответствует примерному плану: время работы над деталью *A* на станках № 2 и 3 равно нулю.

Точка *B* соответствует времени работы над деталью *A*. На станке № 2 – равное 90 мин, а на станке № 3 – 360 мин. По этим данным составляют второй план распределения станков. Причем время, отведенное на производство детали *B* на станках № 2 и 3, будет как дополнение до 360 мин (станки не должны простаивать). Что касается станка № 1, то его время работы подбирается таким, чтобы общее количество деталей *A* и *B* совпадало.

Таким образом, второе решение будет выглядеть так:

Станок	Время загрузки, мин, по деталям		Деталь, шт.	
	А	Б	А	Б
№ 1	0	360	0	1800
№ 2	90	270	540	540
№ 3	360	0	1800	0

Общее количество выпущенной продукции: $2340 + 2340 = 4680$ деталей. Этот результат показывает, что на том же оборудовании может быть выпущено на 30 % больше деталей, чем при глазомерном решении задачи.

Стоит ли дальше пытаться улучшить план?

В теории математического программирования оптимальному решению соответствует одна из вершин многоугольника допустимых планов, а именно та, для которой общая производительность окажется максимальной. В данном случае это точка *C*.

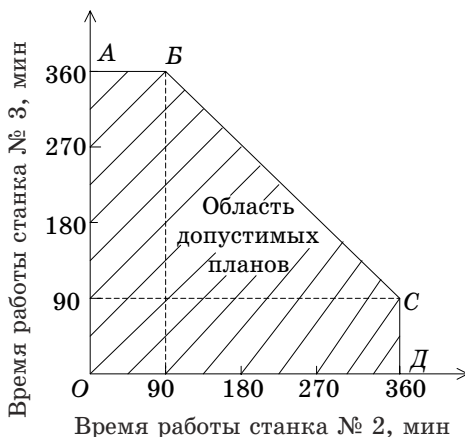


Рис. 27. Время работы над деталью *A*

Действительно, рассчитывая известным уже путем план распределения станков для этой точки, получим следующее решение:

Станок	Время загрузки, мин, по деталям		Деталь, шт.	
	А	Б	А	Б
№ 1	0	360	0	1800
№ 2	360	0	2160	0
№ 3	90	270	430	810

Общее количество выпущенной продукции составит $2610 + 2610 = 5220$ деталей. Таким образом, полученный план на 45 % лучше, чем глазомерный. И этот весьма существенный прирост не требует никакого дополнительного расхода ресурсов.

Сущность математического программирования, как видно, заключается в том, чтобы вместо «слепого» перебора вариантов плана вести перебор выборочный, направленный на скорейшее последовательное улучшение результата. Поэтому в данном случае рассматривали не все точки области допустимых планов (их бесчисленное множество), а только вершины многоугольника, одна из которых и дала наилучшее решение.

3. Как эффективнее использовать технику

Рассмотрим некую производственную ситуацию. Например, организация, занимающаяся механизацией трудоемких работ, располагает набором однородных технических средств в количестве 30 единиц, которые размещаются в трех базах A_1 , A_2 , A_3 . При этом базы A_1 и A_2 имеют по 11 единиц техники, а база A_3 — 8 единиц. Использование этой техники планируется на четырех объектах B_1 , B_2 , B_3 , B_4 . Причем объект B_1 нуждается в 5 единицах, объекты B_2 и B_3 — в 9 единицах каждый, а объект B_4 — в 7 единицах техники.

Эффективность эксплуатации технических средств во многом зависит от того, насколько интенсивно они используются, т. е. чем меньше простой, тем выше эффективность. В данном случае простой машин определяется, главным образом, тем, на каком объекте они работают. Например, машины базы A_3 , занятые на объекте B_1 , простаивают в среднем 6 ч в неделю, а те же машины на объекте B_3 бездействуют лишь 1 ч в неделю.

Общая картина использования техники показана в табл. 2.

Таблица 2

Простои техники (в часах за неделю)

Количество техники на базе	Количество техники на объекте			
	B_1 5	B_2 9	B_3 9	B_4 7
A_1 11	7	8	5	3
A_2 11	2	4	5	9
A_3 8	6	3	1	2

Необходимо разработать такой план распределения техники по объектам, при котором суммарное время простоя техники окажется наименьшим. Это будет так называемая транспортная задача математического программирования. Одним из наиболее распространенных методов решения подобных задач является метод потенциалов. Прежде всего, составляем исходный план распределения машин по объектам.

В правые верхние углы клеток таблицы поместим цифры простоя машин, освободив тем самым нижнюю половину клеток для цифр, характеризующих количество распределяемых единиц техники.

Первоначально заполняется первая строка плана. Очевидно, что распределение целесообразно выполнить по тому направлению, где время простоя минимально, т. е. $A_1 B_4$. Здесь время простоя (обозначим его C_{14}) равно 3 ч. Количество машин на этом направлении устанавливается как минимальное из их общего количества, имеющегося на A_1 и потребного для B_4 , и равняется 7. Таким образом, достигается либо полный расход техники данной базы, либо полное насыщение техникой данного объекта. В рассматриваемом случае полностью насыщается объект B_4 .

После указанной операции на базе A_1 остаются 4 единицы, которые записываем в скобках рядом с цифрой 11. Этот остаток целесообразно направить на объект B_3 , поскольку простои по направлению $A_1 B_3$ будут минимальными из оставшихся. Теперь все ресурсы базы A_1 оказываются исчерпанными, а на объекте B_3 остается потребность в 5 единицах (эта цифра записывается рядом с 9 в скобках).

Поскольку все ресурсы базы A_1 израсходованы, переходим ко второй строке плана, где описание операций повторяется, и т. д.

В результате получаем первый, или исходный, план распределения машин по объектам (табл. 3).

Таблица 3

Первый план (исходный)

База	Объект				u_{A_i}
	B_1 5	B_2 9(3)	B_3 9(5)	B_4 7	
A_1 11(4)	5 < 7	7 < 8	5	3	0
A_2 11(6)	2	4	2 < 5	0 < 9	-3
A_3 8 (3)	5 1 < 6	6 3	1	-1 < 2	-4
u_{B_j}	5	7	5	3	

Чтобы определить оптимальность полученного плана, время простоя, характеризующее эффективность решаемой задачи, будем рассматривать в качестве некоторой стоимости: чем время простоя меньше, тем меньше и стоимость работы.

Вводим понятие потенциала. Потенциалами являются некоторые числа u_{A_i} и u_{B_j} , приписываемые соответственно базам и объектам, сумма которых для клеток плана, содержащих цифры распределенных машин, равна стоимости результата времени простоя, т. е.

$$u_{A_i} + u_{B_j} = c_{ij} (x_{ij} > 0), \quad (22)$$

а для тех клеток, где распределения нет, эта сумма будет не более стоимости результата, т. е.

$$u_{A_i} + u_{B_j} \leq (c_{ij} x_{ij} \leq 0). \quad (23)$$

План, все клетки которого отвечают условиям (22), (23), является оптимальным.

Чтобы определить оптимальность указанного исходного плана, вначале рассчитаем и внесем в табл. 3 значения потенциалов баз и объектов.

Примем, что $u_{A_1} = 0$, тогда

$$u_{A_3} = c_{13} - u_{A_1} = 5 - 0 = 5;$$

$$u_{B_4} = c_{14} - u_{A_1} = 3 - 0 = 3;$$

$$u_{A_3} = c_{33} - u_{B_3} = 1 - 5 = -4;$$

$$u_{B_3} = c_{23} - u_{A_3} = 3 - (-4) = 7;$$

$$u_{A_2} = c_{22} - u_{B_2} = 4 - 7 = -3;$$

$$u_{B_1} = c_{21} - u_{A_2} = 2 - (-3) = 5.$$

Проверим теперь, соблюдается ли условие потенциальности для свободных клеток. Просуммируем для каждой из них соответствующие потенциалы баз и объектов и сравним полученные значения с временем простоя, проставленным в правых верхних углах клеток.

Суммы потенциалов для свободных клеток называются псевдостоимостями и обозначаются C_{ij} . Их записывают в левых верхних углах клеток.

Из выражений (22) и (23) следует, что для оптимального варианта плана $C - C_{ij} \leq 0$. Как видно из табл. 3, условие (22) выполняется для всех свободных клеток. Следовательно, этот план оптимальный.

В случае, если условие оптимальности не соблюдено, план подлежит улучшению.

4. Как рационально распределить бригады по видам работ

Допустим, что производственное предприятие располагает четырьмя бригадами рабочих-специалистов определенного профиля: условно A_1, A_2, A_3, A_4 . Специалисты из этих бригад распределяются по пяти различным видам работ: условно B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 . От того, как будут распределены по этим видам рабочие, зависит в первую очередь качество продукции.

При составлении конкретного плана распределения рабочих-специалистов целесообразно применять математическое программирование.

Прежде всего составляется таблица исходного плана (табл. 4), подобная табл. 3. В качестве стоимостей и псевдостоимостей в данном случае выступают стоимости бракованной продукции, получаемой при данном распределении рабочих по видам работ.

Здесь в трех клетках A_1B_5 , A_2B_1 и A_4B_5 псевдостоимости оказываются большими, чем соответствующие стоимости (эти неравенства подчеркнуты). Таким образом, условие оптимальности не соблюдается и, следовательно, план требует улучшения. Для этого необходимо ввести распределение рабочих в ту из клеток, где имеются наибольшие нарушения условий оптимальности, т. е. где разность между псевдостоимостью и стоимостью наибольшая (она подчеркнута двойной чертой в клетке A_2B_1).

Таблица 4

Первый план (исходный)

Бригада	Виды работ					u_{A_i}
	B_1 24(12)	B_2 15(13, 4)	B_3 10	B_4 20	B_5 7	
A_1 22(2)	11 < 12	8	7 < 10	4	<u>10 > 9</u>	0
A_2 19(9)	$\frac{6 < 3}{h_1}$	3 9 - h_1	2 10	-1 < 6	5 < 10	
A_3 29(12)	3 12	0 < 7	-1 < 10	-4 < 3	2 7	-8
A_4 16(12)	8 $12 - h_1$	5 4 + h_1	4 = 4	1 < 3	<u>7 > 5</u>	-3
	11	8	7	4	10	

Чтобы при заполнении A_2B_1 не был нарушен общий баланс распределения, необходимо перераспределение специалистов выполнить так, чтобы сумма ресурсов рабочих по всем горизонталям и вертикалям сохранялась. Достигается это тем, что рабочие перераспределяются лишь в пределах определенного контура, начало и конец которого находится в полученной свободной клетке A_2B_1 (отмечен штриховой линией). Изменение направления контура следует производить в тех клетках, где есть распределение. Причем необходимо стремиться к тому, чтобы поворотные клетки, лежащие на одной горизонтали и вертикали со свободной клеткой, содержали работы наибольшей стоимости (с наибольшим браком). Это выгодно, так как количество рабочих в указанных клетках будет уменьшаться на

h человек для компенсации нового распределения в клетке A_2B_1 . Тем самым брак будет уменьшаться.

Для соблюдения общего баланса добавляют h рабочих в клетку A_4B_2 . В контуре происходит чередование знаков дополнительного распределения h в поворотных клетках: в клетке A_2B_1 — плюс, в клетке A_2B_4 — минус и т. д. Величина дополнительного количества рабочих h должна избираться таким образом, чтобы ни одно из распределений не становилось отрицательным. В данном случае $h_1 = 9$.

После распределения рабочих в контуре получим второй план, который вследствие более рационального распределения специалистов будет лучше исходного (табл. 5).

Таблица 5

Второй план (улучшенный)

Бригада	Виды работ					u_{A_i}
	B_1 24	B_2 15	B_3 10	B_4 20	B_5 7	
A_1 22	11 < 12	8	10 = 10	4	<u>10 > 9</u>	0
A_2 19	3 9 - h_1	0 < 3	10 - h_2	-4 < 6	2 < 10	-8
A_3 19	12	0 < 7	2 < 10	-4 < 3	$\frac{2}{7}$	-8
A_4 16	3 - h_2	5 13	$\frac{7 > 4}{h_2}$	1 < 3	7 > 5	-3
	11	8	10	4	10	

Общая стоимость брака по первому плану y_1 составляла

$$y_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij} = 8 \times 2 + 4 \times 20 + 3 \times 9 + 2 \times 10 + 3 \times 12 + 2 \times 7 + 8 \times 12 + 5 \times 4 = 309.$$

После улучшения плана стоимость брака Δy уменьшилась на величину

$$\Delta y = C_{21}h_1 - C_{22}h_1 + C_{42}h_1 - C_{41}h_1 = h_1(C_{21} - C_{22} + C_{42} - C_{41}) = (3 - 3 + 5 - 8)9 = 27.$$

Общая стоимость брака по второму плану y_2 будет

$$y_2 = y_1 - \Delta y = 309 - 27 = 282.$$

При проверке второго плана на оптимальность устанавливаем, что условие оптимальности не соблюдено в клетках A_1B_5 и A_4B_3 , причем последняя из них имеет наибольшую разность между псевдо-стоимостью и стоимостью. Строим контур относительно указанной клетки (см. табл. 5), величина дополнительного количества рабочих $h_2 = 3$.

После перераспределения рабочих получим третий план (табл. 6), который экономичнее второго на величину

$$y_3 = y_2 - \Delta y = (C_{43} - C_{41} + C_{21} - C_{23})h_2 = (4 - 8 + 3 - 2)3 = -9.$$

Таблица 6

Третий план (оптимальный)

Бригада	Виды работ					u_{A_i}
	B_1 24	B_2 15	B_3 10	B_4 20	B_5 7	
A_1 22	8 < 12	8 2	7 < 10	4 20	7 < 9	0
A_2 19	3 12	3 = 3	2 7	-1 < 6	2 < 10	-5
A_3 19	3 12	3 < 7	2 < 10	-1 < 3	2 = 2 7	-5
A_4 16	5 < 8	5 13	4 3	1 < 3	4 > 5	-3
u_{B_j}	8		7	4	7	

Стоимость брака по третьему плану, таким образом, равна -9 .

Проверка условия оптимальности показывает, что третий план является оптимальным.

Заметим, что оптимизация плана распределения рабочих-специалистов по видам работ привела к сокращению брака (по его стоимости) на 12 % $\left(\frac{309 - 273}{309} 100 \right)$. И это улучшение качества достигнуто без ввода каких-либо дополнительных ресурсов, исключительно за счет составления обоснованного плана.

5. Как составить расписание деятельности сотрудника (задача директора)

Важной областью выработки решений производственных задач является составление всевозможных расписаний. С их помощью определяется порядок действий персонала предприятий, устанавливается последовательность выполнения операций обработки материалов и сборки сложных изделий, назначается очередность при распределении различных материальных благ и т. д.

Простейшее решение по составлению расписаний имеет так называемая задача директора. Сущность этой задачи заключается в следующем.

На прием к директору записалось n посетителей. Секретарь составил список в алфавитном порядке, указав для каждого посетителя ориентировочную продолжительность приема T_i . Фамилии записавшихся обозначены в списке их заглавными буквами (табл. 7).

Таблица 7

Список записавшихся на прием

№	Фамилия (начальная буква)	Продолжительность приема, мин	Время ожидания, мин
1	Б	25	0
2	Д	15	25
3	Е	10	40
4	К	5	50
5	С	35	55
6	Т	30	90
Суммарное время:		120 мин = 2 ч	260 мин = 4 ч 20 мин

Как видно из таблицы, на весь прием отводилось 2 ч, поэтому секретарь смог составить расписание только на шесть посетителей. В отношении общей продолжительности приема любая очередность посетителей равнозначна: суммарное время приема не меняется при любой его последовательности. Подсчитаем общее время ожидания как сумму времени ожидания всех посетителей. В списке оно составляет 260 мин = 4 ч 20 мин. Понятно, что это время желательно было бы уменьшить, ведь оно будет потрачено зря. Возможно ли расписание с другой последовательностью приема, которое приведет к экономии общего времени ожидания при сохранении намеченного суммарного времени приема?

Оказывается, такое расписание возможно. Наименьшее суммарное время ожидания получается при составлении расписания в порядке нарастания продолжительности приема (табл. 8).

Таблица 8

Оптимальное расписание приема

№	Фамилия (начальная буква)	Продолжительность приема, мин	Время ожидания, мин
1	К	5	0
2	Е	10	5
3	Д	15	15
4	Б	25	30
5	Т	30	55
6	С	35	85
Суммарное время:		120 мин = 2 ч	190 мин = 3 ч 10 мин

6. Как реализовать сетевое планирование

Сетевое планирование служит для составления рационального плана решения производственной задачи в кратчайший срок и с минимальными затратами. Методы сетевого планирования дают возможность своевременно оценивать «узкие» места, вносить необходимые коррективы в организацию решения.

Все мероприятия решаемой задачи в их взаимосвязи составляют схему – сетевой график (рис. 28), включающий работы и события.

Работа представляет собой выполнение некоторого мероприятия, например, выполнение определенной технологической, транспортной или складской операции. Работа связана с затратой времени и расходом ресурсов, она должна иметь начало и конец. На графике работа обозначается стрелкой, над которой указывают ее номер (большая буква с индексом).

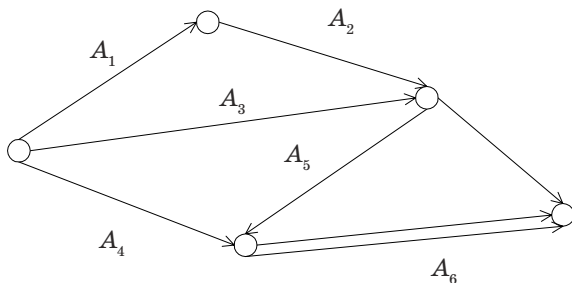


Рис. 28. Пример сетевого графика

Событиями A_i называются начальные и конечные точки работы, например, начало или окончание производственной операции. Событие не является процессом и поэтому не сопровождается затратами времени или ресурсов. На графике событие обозначается кружком.

Относительно данной работы события могут быть предшествующие (непосредственно перед ней) и последующие (непосредственно за ней). Относительно данной работы другие работы могут быть предшествующие и последующие. Каждая входящая в данное событие работа является предшествующей каждой выходящей работе, каждая выходящая работа – последующей для каждой входящей.

Сетевой график обладает следующими основными свойствами:

- ни одно событие не может произойти до тех пор, пока не будут закончены все входящие в него работы;
- ни одна работа, выходящая из данного события, не может начаться до тех пор, пока не произойдет данное событие;
- ни одна последующая работа не может начаться раньше, чем будут закончены все предшествующие ей работы.

При построении сетевого графика сначала разрабатывают перечень событий, которые определяют планируемый процесс (производственную задачу), без которых он не может состояться. Затем предусматривают работы, в результате которых все необходимые события должны произойти.

Построение сетевого графика рассмотрим на конкретном примере.

Заводу поставлена производственная задача – изготовление нового вида продукции. Задача должна решаться двумя цехами (цехи I и II).

Прежде всего в цехах одновременно проводят необходимые подготовительные мероприятия. Затем цехи выполняют первоначальные производственные технологические операции независимо друг от друга. После окончания предварительных технологических операций предусматривается, что цех II продолжает работу, а цех I, прежде чем ее продолжить, передает цеху II часть изготовленных узлов. В цехе II они соединяются с узлами, подготовленными здесь к этому времени. После соединения узлов часть из них передает цеху I, где производятся завершающие работы. Цех II в это время выполняет завершающие работы с оставшимися у него узлами. По завершении работ в цехах изготовленные узлы доставляются к месту сборки и соединяются в готовое изделие.

На основании такой схемы выполнения задачи составляют перечень событий (табл. 9) и перечень работ (табл. 10), необходимых для выпуска новой продукции.

Таблица 9

Перечень событий планируемой производственной задачи

Обозначение события	Наименование события
a_0	Плановый срок начала работы
a_1	Подготовительные мероприятия в цехах окончены
a_2	Выполнены предварительные технологические операции в цехе I
a_3	Выполнены предварительные технологические операции в цехе II
a_4	Выполнены последующие технологические операции в цехе II. Цех II готов к выполнению завершающих операций
a_5	Выполнены последующие технологические операции в цехе I. Цех I готов к выполнению завершающих операций
a_6	Закончены завершающие технологические операции в цехах I и II
a_7	Изделие готово

В таблице работ устанавливают время как на производственные, так и на транспортные операции (цехи I и II расположены в отдалении друг от друга).

Таблица 10

Перечень работ планируемой производственной задачи

Обозначение работы	Наименование работы	Продолжительность выполнения работы, ч	Предшествующие работы	Последующие работы
A_{01}	Выполнение подготовительных мероприятий в цехах I и II	4	—	A_{12}, A_{13}
A_{12}	Выполнение предварительных технологических операций в цехе I	8	A_{01}	A_{24}, A_{25}
A_{13}	Выполнение предварительных технологических операций в цехе II	4	A_{01}	A_{34}
A_{21}	Передача части изготовленных узлов изделия из цеха I в цех II	12	A_{12}	A_{45}, A_{46}
A_{25}	Выполнение последующих технологических операций в цехе I	4	A_{12}	A_{56}
A_{34}	Выполнение последующих технологических операций в цехе II	24	A_{13}	A_{45}, A_{46}
A_{45}	Передача части изготовленных узлов изделия из цеха II в цех I	4	A_{24}, A_{34}	A_{56}
A_{46}	Выполнение завершающих технологических операций в цехе I	4	A_{24}, A_{34}	A_{67}
A_{56}	Выполнение завершающих технологических операций в цехе II	8	A_{25}, A_{45}	A_{67}
A_{67}	Доставка изготовленных узлов изделия к месту сборки. Сборка и проверка изделия	4	A_{46}, A_{56}	—

События, которые не имеют входящих в них работ, называются событиями первого ранга; с них начинается нумерация. Из графика вычеркиваются все работы, выходящие из событий первого ранга, а среди них находятся события, не имеющие входящих работ. Это события второго ранга, которые нумеруются следующими числами, и т. п.

Поскольку в процессе вычеркивания движение осуществляется в направлении стрелок (работ), а сетевой график имеет конечное число событий, никакое предшествующее событие не может получить номер больший, чем любое последующее. Кроме того, всегда находится хотя бы одно событие соответствующего ранга.

Каждая работа кодируется индексом с номерами событий, между которыми она заключена. Совершение события зависит от окончания самой длительной из всех входящих в него работ. Последовательные работы и события формируют пути (цепочки), которые ведут от исходного к завершающему событию. Максимальное число отдельных работ, входящих в какой-либо из путей, ведущих из исходного события в данное, и дает ранг события.

Первый ранг события a_1 показывает, что путь, ведущий в это событие из исходного события a_0 , состоит не более чем из одной работы. А событие a_4 будет иметь третий ранг, так как пути, ведущие в него из исходного события a_0 , включают три работы: A_{01} , A_{13} , A_{34} или A_{01} , A_{12} , A_{24} .

Сетевой график дает возможность оценить количество и качество мероприятий планируемой производственной задачи. Он позволяет установить, от каких из них и в какой степени зависит достижение конечной цели действий. Так, ранг события показывает, какое количество работ необходимо выполнить, чтобы оно состоялось.

Сетевой график также показывает, какое мероприятие следует выполнять в первую очередь, какие мероприятия можно выполнять параллельно. Так, в рассматриваемом примере ни одна последующая работа не может выполняться раньше, чем закончатся все предшествующие, а работы A_{24} и A_{25} могут выполняться параллельно.

После построения сетевого графика производится его анализ.

Основные параметры (величины) сетевого графика.

1. Наиболее раннее возможное время наступления j -го события $T_p(j)$, вычисляемое по формуле

$$T_p(j) = \max_{i \in j} \{T_p(i) + t_{ij}\}, \quad (24)$$

где символами i и j обозначены номера соответственно предшествующего и последующего событий; t_{ij} — продолжительность (i, j) -й рабо-

ты; обозначение $i \subset j$ показывает, что событие i предшествует событию j .

2. Самое позднее допустимое время наступления i -го события $T_{\Pi}(i)$, вычисляемое по формуле

$$T_{\Pi}(i) = \min_{i \supset j} \{T_{\Pi}(j) + t_{ij}\},$$

где обозначение $i \supset j$ показывает, что событие j предшествует событию i .

3. Резерв времени данного события R_i , вычисляемый по формуле

$$R_i = T_{\Pi}(i) - T_p(i).$$

4. Полный резерв времени работы $r_{\Pi}(i, j)$, вычисляемый по формуле

$$r_{\Pi}(ij) = T_{\Pi}(j) - T_p(i) - t_{ij}.$$

Суть полного резерва времени работы заключается в том, что задержка в выполнении работы (i, j) на величину $\Delta t_{ij} > r_{\Pi}$ приводит к задержке в наступлении завершающего события на величину $\Delta t_{ij} - r_{\Pi}(ij)$.

5. Свободный резерв времени работы $r_c(i, j)$, вычисляемый по формуле

$$r_c(ij) = T_p(j) - T_{\Pi}(i) - t_{ij}.$$

Суть свободного резерва времени работы заключается в том, что задержка в выполнении работы на величину $\Delta t_{ij} \leq r_c(i, j)$ не влияет ни на один другой срок, определенный данным сетевым графиком.

Основные показатели сетевого графика, по которым выполняется его анализ.

1. Критический путь, т. е. полный путь, на котором суммарная продолжительность работ является максимальной. Иными словами, это самый длинный по времени путь в сетевом графике от исходного до завершающего события. Критический путь лимитирует выполнение задачи в целом, поэтому любая задержка на работах критического пути увеличивает время всего процесса. События, через которые проходит критический путь в работы, выполняемые не на критических путях, называются ненапряженными. У критических работ как полные, так и свободные резервы времени равны нулю (признак критической работы). Критический путь рассчитывается определением работ, полные резервы времени которых равны нулю.

2. Полный резерв ненапряженного пути, т. е. резерв времени напряженных событий и работ, находящихся не на критическом

пути. В том случае, если ненапряженный и критический пути не пересекаются, полный резерв времени ненапряженного пути равен разности между его длиной и длиной критического пути (во временной мере). Если ненапряженный и критический пути пересекаются, полный резерв времени равен самому длительному участку ненапряженного пути, заключенному между соответствующими парами событий критического пути. Полный резерв времени ненапряженного пути показывает, насколько в сумме может быть увеличена продолжительность всех работ этого пути без изменения срока выполнения задачи в целом.

Анализ сетевого графика позволяет выявлять резервы времени работ, лежащих на ненапряженных путях, которые направляются на работы, выполненные на критическом пути. Этим достигается сокращение времени выполнения критических работ, а значит — и всей задачи в целом.

Критический путь в рассматриваемом примере можно представить как $a_0 \rightarrow a_1 \rightarrow a_3 \rightarrow a_4 \rightarrow a_5 \rightarrow a_6 \rightarrow a_7$.

Длина критического пути (по времени) равна

$$t_{кр} = t_{0,1} + t_{1,3} + t_{3,4} + t_{4,5} + t_{5,6} + t_{6,7} = 48.$$

На рис. 28 он показан двойной стрелкой.

Ненапряженный путь можно представить как

$$a_0 \rightarrow a_1 \rightarrow a_3 \rightarrow a_4 \rightarrow a_5 \rightarrow a_6 \rightarrow a_7.$$

Поскольку критический и ненапряженный пути пересекаются, полный резерв времени ненапряженного пути будет равен участку ненапряженного пути, заключенному между событиями a_1 и a_4 :

$$t_{1,2} + t_{2,4} = 8 + 12 = 20 \text{ ч.}$$

Проведенный анализ показывает, что сокращение сроков выполнения данной производственной задачи достигается путем перераспределения времени между ненапряженным и критическим путем. Часть ресурсов с ненапряженного пути может быть снята и переведена на критический путь. Тем самым продолжительность критического пути, а значит и время решения задачи в целом, будет сокращена.

3. Временные оценки работ. Время выполнения работы может определяться либо по нормативам (статистическим показателям), либо, при отсутствии их, по следующим эмпирическим формулам:

$$\bar{t}_{ij} = \frac{t_{\min} + 4t_{н.в} + t_{\max}}{6}; \quad (25)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{6}, \quad (26)$$

где \bar{t}_{ij} – математическое ожидание продолжительности выполнения работы (среднеожидаемое время работы); σ_{ij} – среднеквадратическая ошибка в определении продолжительности работы; t_{\min} – продолжительность работы в наиболее благоприятных условиях (оптимистическая оценка); t_{\max} – продолжительность работы при самом неблагоприятном стечении обстоятельств (пессимистическая оценка); $t_{н.в}$ – продолжительность работы при условии, что не возникает никаких неожиданных трудностей (наиболее вероятная оценка).

Математическое ожидание любого параметра сетевого графика, являющегося суммой величин t_{ij} , равно $\sum \bar{t}_{ij}$. Среднеквадратическая ошибка этого параметра

$$\sqrt{\sum \sigma_{ij}^2}.$$

Вероятность совершения j -го события в расчетный срок определяется по формуле

$$P_i = \Phi \left(\frac{T_3 - T_p(j)}{\sqrt{\sum \sigma_{ij}^2}} \right), \quad (27)$$

где Φ – функция Лапласа [9]; T_3 – заданный срок свершения событий; $T_p(j)$ – время раннего свершения j -го события; σ_{ij} – среднеквадратические ошибки в определении продолжительности работ, которые использовались при вычислении раннего срока наступления j -го события.

В соответствии с формулами (25), (27) временные оценки работ составят при $t_{\min} = 4$ ч, $T_3 = 10$ ч; $t_{\max} = 9$ ч, $T_p(j) = 8$ ч; $t_{н.в} = 7$ ч, $\sum \sigma_{ij}^2 = 25$ ч:

среднеожидаемое время выполнения работы

$$t_{ij} = \frac{4 + 4 \times 7 + 9}{6} = 6,84 \text{ ч};$$

среднеквадратическая ошибка в определении продолжительности работы

$$\sigma_{ij} = \frac{9 - 4}{6} = 0,83 \text{ ч};$$

вероятность совершения j -го события в расчетный срок

$$P_i = \Phi\left(\frac{10 - 8}{25}\right) = \Phi(0,4) = 0,43.$$

Таким образом, полученное оптимальное расписание позволяет уменьшить суммарное время ожидания на 1 ч 10 мин.

Задача расписания работы директора с посетителями находит применение не только в приемной руководителя. Таким же образом можно составить и расписание очередности работы станка или другого оборудования над различными деталями. Продолжительность обработки при этом бывает различной, и нужно составить расписание таким образом, чтобы суммарное время обработки оказалось наименьшим. Это дает существенный временной, а значит, и экономический эффект.

**КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ПРИНЯТИЕ
УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ
ИНФОРМАЦИИ, НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ И РИСКА**

Принимать решения приходится во всех областях человеческой деятельности. В интересующей нас области инженерно-экономической практики – в менеджменте и маркетинге – возникает необходимость в принятии сложных количественных решений, последствия которых бывают очень весомы. В связи с этим появляется потребность в руководстве по абстрактной количественной формализации формирования управленческих решений, которое упрощало бы этот процесс принятия решений и придавало решениям большую надежность.

При этом процесс формализации предполагает известное принуждение, так что применяющий их чувствует, что его лишают свободы решения. Как раз в таких случаях становится неизбежным отказ от некоторых требований, связанных с существом дела, а отказ от действительных методов может привести к еще большим потерям. Поэтому мы пытаемся дать обоснованное и наглядное представление о проблемах принятия решений с возможно более полным учетом всех имеющихся аспектов. При этом становится очевидным, что адекватная формализация может оказать существенную помощь при решении практических задач. В этой связи рассмотрим основную формальную структуру принятия решений, следуя [1, 3, 9].

Принятие решения представляет собой выбор одного из некоторого множества рассматриваемых вариантов: $E_i \in E$. В дальнейшем мы будем изучать наиболее часто встречающийся на практике случай, когда имеется лишь конечное число вариантов E_i , причем обычно небольшое, хотя принципиально мыслимо и бесконечное множество вариантов $E_1, E_2, \dots, E_i, \dots$. При необходимости наше рассмотрение без труда переносится на этот наиболее общий случай.

Прежде всего условимся, что каждым вариантом E_i однозначно определяется некоторый результат e_i . Эти результаты должны допускать количественную оценку, и мы будем для простоты отождествлять эти оценки с соответствующими результатами, обозначая их одним и тем же символом e_i .

Мы ищем вариант с наибольшим значением результата, т. е. целью нашего выбора является $\max_i e_i$. При этом мы считаем, что

оценки e_i характеризуют такие величины, как, например, выигрыш, полезность или надежность. Противоположную ситуацию с оценкой затрат или потерь можно исследовать точно так же путем минимизации оценки или, как это делается чаще, с помощью рассмотрения отрицательных величин полезности.

Таким образом, выбор оптимального варианта производится с помощью критерия

$$E_0 = \left\{ E_{i_0} \mid E_{i_0} \in E \wedge e_{i_0} = \max_i e_i \right\}. \quad (28)$$

Это правило выбора читается следующим образом: множество E_0 оптимальных вариантов состоит из тех вариантов E_{i_0} , которые принадлежат множеству E всех вариантов и оценка e_{i_0} которых максимальная среди всех оценок e_i . (Логический знак \wedge читается как «и» и требует, чтобы оба связываемых им утверждения были истинны).

Выбор оптимального варианта в соответствии с критерием (28) не является однозначным, поскольку максимальный результат $\max_i e_i$

может достигаться в множестве всех результатов многократно. Необходимость выбирать одно из нескольких одинаково хороших решений на практике обычно не создает дополнительных трудностей. Поэтому в дальнейшем мы лишь упоминаем об этой возможности, не занимаясь ею более подробно.

Только что рассмотренный случай принятия решений, при котором каждому варианту решения соответствует единственное внешнее состояние (и тем самым однозначно определяется единственный результат) и который мы называем случаем детерминированных решений, с точки зрения его практических применений является простейшим и весьма частым (см. гл. VIII). Разумеется, такие элементарные структуры лежат в основании реальных процедур принятия решений. В более сложных структурах каждому допустимому варианту решения E_i вследствие различных внешних условий могут соответствовать различные внешние условия (состояния) F_j и результаты e_{ij} решений. Следующий пример иллюстрирует это положение.

Пусть из некоторого материала требуется изготовить изделие, долговечность которого при допустимых затратах невозможно определить. Нагрузки считаются известными. Требуется решить, какие

размеры должно иметь изделие из данного материала. Варианты решений таковы:

E_1 — выбор размеров из соображений максимальной долговечности, т. е. изготовление изделия с минимальными затратами в предположении, что материал будет сохранять свои характеристики в течение длительного времени;

E_m — выбор размеров в предположении минимальной долговечности;

E_i — промежуточные решения.

Условия, требующие рассмотрения, таковы:

F_1 — условия, обеспечивающие максимальную долговечность;

F_n — условия, обеспечивающие минимальную долговечность;

F_j — промежуточные условия.

Под результатом решения e_{ij} здесь можно понимать оценку, соответствующую варианту E_i и условиям F_j , характеризующую экономический эффект (прибыль), полезность или надежность изделия. Обычно мы будем называть такой вариант полезностью решения.

Семейство решений описывается некоторой матрицей (табл. 11).

Таблица 11

Матрица решений $\|e_{ij}\|$

	F_1	F_2	F_3	\dots	F_j	\dots	F_n
E_1	e_{11}	e_{12}	e_{13}	\dots	e_{1j}	\dots	e_{1n}
E_2	e_{21}	e_{22}	e_{23}	\dots	e_{2j}	\dots	e_{2n}
E_3	e_{31}	e_{32}	e_{33}	\dots	e_{3j}	\dots	e_{3n}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
E_i	e_{i1}	e_{i2}	e_{i3}	\dots	e_{ij}	\dots	e_{in}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
E_m	e_{m1}	e_{m2}	e_{m3}	\dots	e_{mj}	\dots	e_{mn}

Увеличение объема семейства по сравнению с рассмотренной выше ситуацией детерминированных решений связано как с недостатком информации, так и с многообразием технических возможностей.

Лицо, принимающее решение, и в этом случае старается выбрать решение с наилучшим результатом, но, так как ему не известно, с какими условиями он столкнется, он вынужден принимать во внимание все оценки e_i , соответствующие варианту E_i . Первоначальная

задача максимизации, согласно критерию (28), должна быть теперь заменена другой, подходящим образом учитывающей все последствия любого из вариантов решения E_i .

Чтобы прийти к однозначному и по возможности наивыгоднейшему варианту решения даже в том случае, когда каким-то вариантам решений E_i могут соответствовать различные условия F_j , можно ввести подходящие оценочные (целевые) функции. При этом матрица решений $\|e_{ij}\|$ сводится к одному столбцу. Каждому варианту E_i приписывается, таким образом, некоторый результат e_{ir} , характеризующий в целом все последствия этого решения. Такой результат мы будем в дальнейшем обозначать тем же символом e_{ir} .

Процедуру выбора можно теперь представить по аналогии с применением критерия (28). Возникает, однако, проблема, какой вложить смысл в результат e_{ir} . Если, например, последствия каждого из альтернативных решений характеризовать комбинацией из его наибольшего и наименьшего результатов, то можно принять

$$e_{ir} = \min_j e_{ij} + \max_j e_{ij}. \quad (29)$$

Из сказанного вытекает способ построения оценочных функций, приводимый в табл. 11. Наилучший в этом смысле результат имеет вид

$$\max_i e_{ir} = \max_i \left(\min_j e_{ij} + \max_j e_{ij} \right). \quad (30)$$

Теперь решение можно снова искать в соответствии с критерием (28). Формируя таким образом желаемый результат, ЛПР исходит из компромисса между оптимистическим и пессимистическим подходами.

Рассмотрим теперь некоторые другие оценочные функции, которые в данном примере мог бы выбрать ЛПР, а также соответствующие им исходные позиции.

Оптимистическая позиция:

$$\max_i e_{ir} = \max_i \left(\max_j e_{ij} \right). \quad (31)$$

Из матрицы результатов решений e_{ij} (табл. 11) выбирается вариант (строка), содержащий в качестве возможного следствия наибольший из всех возможных результатов. Наше ЛПР становится на точку зрения азартного игрока. Оно делает ставку на то, что выпа-

дет наивыгоднейший случай, и исходя из этого выбирает количественную оценку объекта СИ (табл. 12).

Позиция нейтралитета:

$$\max_i e_{ir} = \max \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{ij} \right). \quad (32)$$

Лицо, принимающее решение, исходит из того, что все встречающиеся отклонения результата решения от «среднего» случая допустимы, и выбирает размеры, оптимальные с этой точки зрения:

$$\max_i e_{ir} = \max_i \left(\min e_{ij} \right). \quad (33)$$

Лицо, принимающее решение, исходит из того, что надо ориентироваться на наименее благоприятный случай, и приписывает каждому из альтернативных вариантов наихудший из возможных результатов. После этого оно выбирает самый выгодный вариант, т. е. ожидает наилучшего результата в наихудшем случае. Для каждого иного внешнего состояния результат может быть только равным этому или лучшим.

Позиция относительного пессимизма:

$$\min_i e_{ir} = \min_i \max_j \left(\max_i \left(\max_j e_{ij} - e_{ij} \right) \right). \quad (34)$$

Для каждого варианта решения ЛПР оценивает потери в результате по сравнению с определенным по каждому варианту наилучшим результатом. А затем из совокупности наихудших результатов выбирает наилучший, согласно представленной оценочной функции.

Ряд таких оценочных функций можно было бы продолжить. Некоторые из них получили широкое распространение в хозяйственной деятельности. Так, если условия эксплуатации заранее не известны, ориентируются обычно на наименее благоприятную ситуацию. Это соответствует оценочной функции (33). Нередко используются также функции (32) и (34). Оценочная функция (31) до сего времени в организационно-экономических, да и технических приложениях не применялась.

Влияние исходной позиции ЛПР на эффективность результата решения можно интерпретировать исходя из наглядных представле-

Таблица 12

Построение оценочных функций

E_1	e_{1r}
E_2	e_{2r}
E_3	e_{3r}
E_i	e_{ir}
E_m	e_{mr}

ний. С этой целью для простейшего случая ($n=2$) введем прямоугольную систему координат, откладывая по оси абсцисс значения результата решения e_{i1} , соответствующие состоянию F_2 ; $i=1, \dots, m$. В этом случае каждый вариант решения E_i соответствует точке (e_{i1}, e_{i2}) , $i=1, \dots, m$ на плоскости. Точку с координатами $\left(\max_i e_{i1}, \max_i e_{i2} \right)$ мы назовем утопической точкой (УТ). Смысл этого названия в том, что координаты всех точек (e_{i1}, e_{i2}) , $i=1, \dots, m$, соответствующих вариантам решений E_1, \dots, E_m , не могут быть больше, чем у УТ и что УТ встречается среди этих m точек только в том редком, идеальном случае, когда существует вариант решения, дающий максимальный результат для каждого из (двух) возможных внешних состояний. Аналогичное значение имеет и так называемая антиутопическая точка (АУТ), имеющая координаты $\left(\min_i e_{i1}, \min_i e_{i2} \right)$: координаты всех точек (e_{i1}, e_{i2}) , $i=1, \dots, m$, соответствующих вариантам решений E_1, \dots, E_m , не могут быть меньше, чем у точки АУТ. Отсюда следует, что все m точек (e_{i1}, e_{i2}) , $i=1, \dots, m$ лежат внутри прямоугольника, стороны которого параллельны координатным

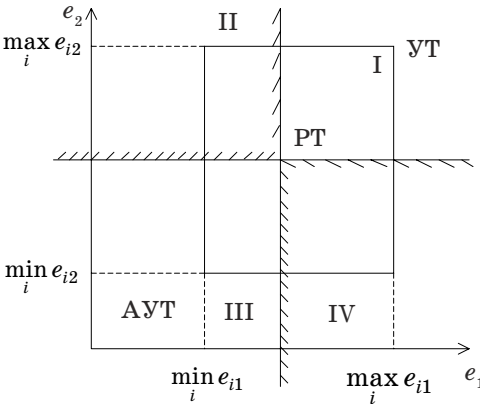


Рис. 29. Поле выбора решений

осям, а противоположные вершины суть точки УТ и АУТ; мы называем этот прямоугольник полем полезности решений (рис. 29).

Теперь, чтобы сравнить варианты решений с точки зрения их качества, назовем вариант E_i не худшим, чем вариант E_j , если для соответствующих точек (e_{i1}, e_{i2}) и (e_{j1}, e_{j2}) выполняются неравенства (e_{i1}, e_{j1}) и (e_{i2}, e_{j2}) , причем E_i считается лучшим,

чем E_j , если хотя бы одно из этих двух неравенств является строгим. Очевидно, что при таком определении не любые два варианта решений допускают сравнение в том смысле, что один из них оказывается лучше другого. (Может случиться, что для точек (e_{i1}, e_{i2}) и

(e_{j_1}, e_{j_2}) , соответствующих вариантам E_i и E_j , выполняются, например, неравенства $(e_{i_1} > e_{j_1}$ и $e_{i_2} < e_{j_2})$.

На математическом языке это означает, что на множестве вариантов решений установлено так называемое отношение частичного порядка, которое обладает рядом свойств, хорошо усматриваемых на рис. 29. Выберем в поле полезности произвольную точку, которую будем называть рассматриваемой (РТ). С помощью прямых, параллельных координатным осям, разобьем плоскость на четыре части и обозначим их I, II, III и IV. В рассматриваемом нами двумерном случае каждая из этих частей имеет вид бесконечного прямоугольника; в случае произвольной размерности они превращаются в так называемые конусы.

Рассматривая положение точек поля полезности относительно этих четырех конусов, можно в общем случае сказать следующее. Все точки из конуса I в смысле введенного выше частичного порядка лучше, чем рассматриваемая точка РТ. Поэтому мы называем конус I конусом предпочтения. Соответственно, все точки из конуса III хуже точки РТ, и мы будем называть область III антиконусом. Таким образом, оценка качества точек из этих двух конусов в сравнении с точкой РТ проста и однозначна. Оценка же точек в отмеченных штриховкой конусах II и IV является неопределенной, вследствие чего их называют областями неопределенности. Для этих точек оценка получается только с помощью выбранного критерия принятия решения. В случае m вариантов решений E_1, \dots, E_m и n внешних состояний F_1, \dots, F_n критерий принятия можно представить в виде

$$\max_{i=1, \dots, m} K(e_{i1}, \dots, e_{in}).$$

Функция n переменных K характеризует соответствующий критерий и задает одновременно оценочную функцию. Для анализа критерия рассмотрим, полагая $e_{i1} = x_1, e_{i2} = x_2, \dots, e_{in} = x_n$, функцию K на всем n -мерном пространстве R^n . Тогда каждому значению действительного параметра k посредством равенства

$$K(x_1, \dots, x_n) = k$$

ставится в соответствие некоторая гиперповерхность в пространстве R^n , называемая нами поверхностью уровня, соответствующей значению k . В двумерном случае, интересующем нас ввиду его наглядности, мы специально полагаем $e_{i1} = x_1, e_{i2} = x_2 = v$, отождествляя тем самым e_{i1} -ось с u -осью, а e_{i2} -ось с v -осью, и с помощью равенства

$$K(u, v) = k$$

получаем в этом случае на плоскости (u, v) кривую, называемую линией уровня, соответствующей значению k . При фиксированном уровне k уравнение $K(u, v) = k$ определяет функциональную зависимость между переменными u и v , называемую функцией предпочтения; допуская терминологическую вольность, так же называют и соответствующую кривую на плоскости (u, v) .

Рассмотрим, например, оценочную функцию (32). При $e_{i1} = u$ и $e_{i2} = v$ получаем для $m = 2$ семейство функций предпочтения, зависящих от параметра k :

$$(u + v) / n = k .$$

При графическом изображении это выражение дает прямые, параллельные биссектрисе второго и четвертого квадрантов плоскости (u, v) . Поскольку рассматриваемому критерию, в соответствии с которым путем оптимального выбора решения максимизируется среднее значение всех возможных результатов, отвечает нейтральная в известном смысле позиция ЛПР, мы приписываем название «нейтральной» и соответствующей функции предпочтения (рис. 30). Выберем теперь на какой-либо линии уровня этого критерия произвольную точку РТ и проведем через нее «осевой крест», разбивающий плоскость на описанные выше четыре квадранта: конус предпочтения, антиконус и конусы неопределенности.

Все точки из областей неопределенности, лежащие справа и выше этой линии уровня, в смысле нашего критерия, лучше точек, лежащих слева и ниже. Сказанное справедливо и для функций предпочтения любого другого критерия. Всякая функция (кривая) предпочтения объединяет все точки фиксированного уровня; справа и выше ее располагаются все лучшие точки, т. е. более высокого уровня, а слева и ниже — худшие, т. е. точки более низкого уровня (подробнее см. [9]).

Если на основе какого-либо критерия получается кривая предпочтения типа штриховой (см. рис. 30), то мы называем такую кривую вогнутой, подразумевая под этим, что в соответствующих ей областях неопределенности имеется меньшее число лучших точек, чем при нейтральном критерии (32). Отметим, что такая вогнутая кривая предпочтения характеризует пессимистическую исходную позицию. Кривые предпочтения типа сплошной на рис. 30 соответствуют оптимистическому подходу, поскольку на этот раз в сравне-

нии с нейтральным критерием больше точек из областей неопределенности принадлежит к числу лучших; мы называем такие кривые выпуклыми. Предельный случай пессимистического подхода образуют, очевидно, граничные прямые квадранта I, а оптимистического – граничные прямые квадранта III, и чем ближе подходит кривая предпочтения к этим граничным прямым, тем в большей степени соответствующий критерий представляет пессимистическую или, соответственно, оптимистическую точку зрения. Если выбор оценочной функции отдается на усмотрение ЛПР, то, как видно из рис. 30, приходится считаться с возможностью различных результатов для одного и того же решения.

Таким образом, принятие решения не есть чисто рациональный процесс. Опасность возникает в тех случаях, когда оценочные функ-

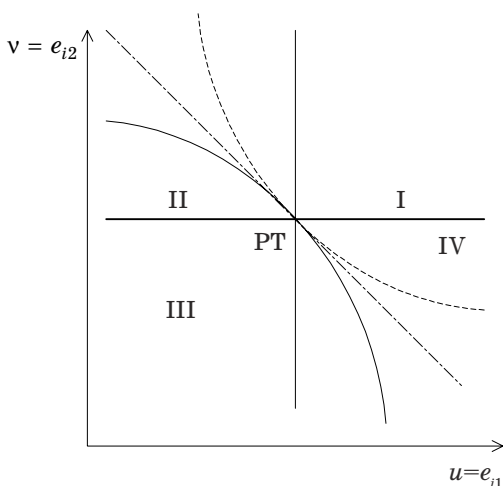


Рис. 30. Функции предпочтения при принятии решений:
 ———— — оптимистическая; — — — — нейтральная;
 — · — — пессимистическая

ции выбираются интуитивно, иногда даже без выяснения исходной позиции принимающего решение.

Всякое техническое или экономическое решение в условиях неполной информации – сознательно или несознательно – принимается в соответствии с какой-либо оценочной функцией описанного выше типа. Как только это бывает признано явно, следствия соответствующих решений становятся лучше обозримыми, что позволяет улуч-

шить их качество. При этом выбор оценочных функций всегда должен осуществляться с учетом количественных характеристик ситуации, в которой принимаются решения.

Таблица 13

$(m \times 2)$ – матрица решений

F	F_1	F_2
E		
E_1	e_{11}	e_{12}
E_1	e_{21}	e_{22}
E_1	e_{31}	e_{32}
\vdots	\vdots	\vdots
E_1	e_{i1}	e_{i2}
\vdots	\vdots	\vdots
E_1	e_{m1}	e_{m2}

Схематическое сопоставление всех возможных полезностей e_{ij} различных решений в матрице (табл. 11) облегчает поначалу их обозрение, не требуя при этом формальной оценки. Эта матрица может быть меньшего объема (табл. 13) и даже выродиться в единственный столбец, если будет представлена полная информация о том, с каким внешним состоянием F_j следует считаться. Это соответствует элементарному сравнению различных технических решений. Матрица решений может, однако, свестись и к единственной строке (табл. 14). В этом случае мы имеем дело с так называемой фатальной ситуацией принятия решений, когда в силу ограничений технического характера, внешних условий и других причин остается един-

ственный вариант E_i , хотя его дальнейшие последствия зависят от внешнего состояния F_j , и поэтому результат решения оказывается неизвестным.

Таблица 14

Фатальная ситуация в принятии решений

	F_1	F_2	F_3	...	F_j	...	F_n
E_1	e_{11}	e_{12}	e_{13}	...	e_{1j}	...	e_{1n}

Случается и так, что некоторый вариант решения, например E_R , оказывается настолько удачным, что для другого варианта E_i из матрицы решений выполняются неравенства $e_{Rj} \geq e_{ij}$ для $j = 1, \dots, n$. Тогда говорят, что вариант E_R доминирует над вариантом E_i . Вариант E_R в этом случае с самого начала оказывается лучшим, а вариант E_i , напротив, не представляет далее интереса. Более подробно понятие доминирования рассмотрено в [10].

Ради возможности графической интерпретации вернемся еще раз к решениям с двумя только внешними состояниями F_1 и F_2 . Все

варианты, доминирующие над точкой РТ, лежат на рис. 30 в конусе предпочтения (т. е. в I квадранте), а варианты, над которыми РТ доминирует, расположены в антиконусе (в III квадранте). Следовательно, для формального оценивая остаются точки из II и IV квадрантов, первоначально названных областями неопределенности. В этих квадрантах необходимо найти варианты, оптимальные в смысле различных критериев, и их количественные оценки. Для этого соответствующие функции предпочтения должны быть в обеих областях разумным образом упорядочены.

Для случаев формального оценивания вариантов принятия решений в квадрантах II и IV (см. рис. 30), когда условия не определены, но являются пассивными в теории принятия решений [1, 3, 11], разработан ряд критериев, которые могут использоваться для выбора рационального варианта принятия решения. К их числу относятся следующие классические критерии.

Минимаксный критерий (ММ) использует оценочную функцию (33), соответствующую позиции крайней осторожности.

При

$$Z_{\text{ММ}} = \max_i e_{ij}$$

и

$$e_{ij} = \min_j e_{ij}$$

справедливо соотношение

$$E_0 = \left\{ E_{i0} \mid E_{i0} \in E \wedge e_{i0} = \max \min e_{ij} \right\},$$

где $Z_{\text{ММ}}$ — оценочная функция ММ-критерия.

Поскольку в области технических и организационно-экономических задач построение множества E вариантов уже само по себе требует весьма значительных усилий, причем иногда возникает необходимость в их рассмотрении с различных точек зрения, условие $E_{j0} \in E$ включается во все критерии. Оно должно напоминать о том, что совокупность вариантов необходимо исследовать возможно более полным образом, чтобы была обеспечена оптимальность выбираемого варианта.

Правило выбора решения в соответствии с ММ-критерием можно интерпретировать следующим образом.

Матрица $\|e_{ij}\|$ решений дополняется еще одним столбцом из наименьших результатов e_{ij} каждой строки. Выбрать надлежит те вари-

анты E_{i0} , в строках которых стоят наибольшие значения e_{ij} этого столбца.

Выбранные таким образом варианты полностью исключают риск. Это означает, что ЛПР не может столкнуться с худшим результатом, чем тот, на который он ориентируется. Какие бы условия F_j ни встретились, соответствующий результат не может оказаться ниже Z_{MM} . Это свойство заставляет считать минимаксный критерий одним из фундаментальных. Поэтому в технических задачах он применяется чаще всего, как сознательно, так и неосознанно. Однако положение об отсутствии риска стоит различных потерь.

Продемонстрируем это на небольшом примере (табл. 15).

Таблица 15

Пример вариантов решения без учета риска

	F_1	F_2	e_{ij}	$\max_i e_{ij}$
E_1	1	100	1	
E_2	1,1	1,1	1,1	1,1

Хотя вариант E_1 кажется издали более выгодным, согласно ММ-критерию, оптимальным следует считать $E_0 = \{E_2\}$. Принятие решения по этому критерию может, однако, оказаться еще менее разумным, если состояние F_2 встречается чаще, чем состояние F_1 , и решение реализуется многократно.

Выбирая вариант E_2 , предписываемый ММ-критерием, мы, правда, избегаем неудачного значения 1, реализующегося вариантом E_1 при внешнем состоянии F_1 , получая вместо него при этом состоянии немного лучший результат 1,1, зато в состоянии F_2 теряем выигрыш 100, получая всего только 1,1. Этот пример показывает, что в многочисленных практических ситуациях пессимизм минимаксного критерия может оказаться очень невыгодным.

Применение ММ-критерия бывает оправданно, если ситуация, в которой принимается решение, характеризуется следующими обстоятельствами:

- о возможности появления внешних состояний F_j ничего не известно;
- приходится считаться с появлением различных внешних состояний F_j ;
- решение реализуется лишь один раз;

– необходимо исключить какой бы то ни было риск, т. е. ни при каких условиях F_j не допускается получить результат, меньший чем $Z_{\text{ММ}}$. Более обстоятельно проблема риска, связанного с принятием решений, рассматривается в [9]. Причем при построении оценочной функции $Z_{\text{ММ}}$ (согласно ММ-критерию) каждый вариант E_i представлен лишь одним из своих результатов $e_{ij} = \min e_{ij}$.

Критерий Байеса–Лапласа (BL), напротив, учитывает каждое из возможных следствий.

Пусть q_j – вероятность появления внешнего состояния F_j , тогда для BL-критерия

$$Z_{\text{BL}} = \max_i e_{ir}; \quad e_{ij} = \sum_{j=1}^n e_{ij} q_j,$$

$$E_0 = \left\{ E_{i0} \left| E_{i0} \in E \wedge t_{i0} = \max_i \sum_{j=1}^n e_{ij} q_j \wedge \sum_{j=1}^n q_j = 1 \right. \right\}.$$

Соответствующее правило выбора можно интерпретировать следующим образом.

Матрица решений $\|e_{ij}\|$ дополняется еще одним столбцом, содержащим математическое ожидание значений каждой из строк. Выбираются те варианты E_{i0} , в строках которых стоит наибольшее значение e_{ir} этого столбца.

При этом предполагается, что ситуация, в которой принимается решение, характеризуется следующими обстоятельствами:

- вероятности появления состояний F_j известны и не зависят от времени;
- решение реализуется (теоретически) бесконечно много раз;
- для малого числа реализаций решения допускается некоторый риск.

При достаточно большом количестве реализаций среднее значение постепенно стабилизируется. Поэтому при полной (бесконечной) реализации какой-либо риск практически исключен.

Исходная позиция применяющего BL-критерий оптимистичнее, чем в случае ММ-критерия, однако она предполагает более высокий уровень информированности и достаточно длинные реализации.

Для критерия Сэвиджа, введенного выше соотношением (34), с помощью обозначений

$$a_{ij} = \max_i e_{ij} - e_{ij}, \tag{35}$$

$$e_{ir} = \max_j a_{ij} = \max_j \left(\max_i e_{ij} - e_{ij} \right) \quad (36)$$

формируется оценочная функция

$$Z_\delta = \min_i e_{ir} = \min_i \left[\max_j \left(\max_i e_{ij} - e_{ij} \right) \right] \quad (37)$$

и строится множество оптимальных вариантов решения

$$E_0 = \left\{ E_{i0} \mid E_{i0} \in E \wedge e_{i0} = \min_i e_{ir} \right\}. \quad (38)$$

Для понимания этого критерия определяемую соотношением (35) величину $a_{ij} = \max_i e_{ij} - e_{ij}$ можно трактовать как максимальный дополнительный выигрыш, который достигается, если в состоянии F_j вместо варианта E_i выбрать другой, оптимальный для этого внешнего состояния вариант. Мы можем, однако, интерпретировать a_{ij} и как потери (штрафы), возникающие в состоянии F_j при замене оптимального для него варианта на вариант E_i . Тогда определяемая соотношением (36) величина e_{ij} представляет собой ММ-критерий при интерпретации a_{ij} в качестве потерь максимально возможные (по всем внешним состояниям $F_j, j=1, \dots, n$) потери в случае выбора варианта E_i . Теперь, согласно (37) и (38), эти максимально возможные потери минимизируются за счет выбора подходящего варианта E_i .

Соответствующее S-критерию правило выбора теперь интерпретируется так.

Каждый момент матрицы $\|e_{ij}\|$ решений вычитается из наибольшего результата $\max_i e_{ij}$ соответствующего столбца.

Разности a_{ij} образуют матрицу остатков $\|a_{ij}\|$. Эта матрица пополняется столбцом наибольших разностей e_{ij} . Выбираются те варианты E_{i0} , в строках которых стоит наименьшее для этого столбца значение.

По выражению (37) оценивается значение результатов тех состояний, которые, вследствие выбора соответствующего распределения вероятностей, оказывают одинаковое влияние на решение. С точки

зрения результатов матрицы $\|e_{ij}\|$ S-критерий связан с риском, однако, с позиций матрицы $\|a_{ij}\|$ он от риска свободен. В остальном к ситуации принятия решений предъявляются те же требования, что и в случае ММ-критерия.

Рассмотрим в заключение еще один метод, допускающий интерпретацию в качестве расширенного минимаксного критерия. В нем используются простейшие понятия теории вероятностей, а также, в известном смысле, теории игр. Основным здесь является предположение о том, что каждому из n возможных внешних состояний F_j приписана вероятность его появления

$$q_j: 0 < q_j < 1, \quad \sum_{j=1}^n q_j = 1.$$

Сформируем из n вероятностей q_1 вектор с компонентами (q_1, \dots, q_n) и обозначим через W^n множество всех n -мерных вероятностных векторов. Выбор какого-либо варианта решения E_i приводит при

достаточно долгом применении E_i к среднему результату $\sum_{j=1}^n e_{ij} q_j$.

Если же теперь случайным образом с распределением вероятностей $p = (p_1, \dots, p_m) \in W^{(m)}$ смешать m вариантов решений E_i , то в результате получим среднее значение

$$e(p, q) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n e_{ij} p_i q_j.$$

В реальной ситуации вектор $q = (q_1, \dots, q_n)$, относящийся к состояниям F_j , бывает, как правило, неизвестен. Ориентируясь применительно к значению $e(p, q)$ на наименее выгодное распределение q состояний F_j и добиваясь, с другой стороны, максимального увеличения $e(p, q)$ за счет выбора наиболее удачного распределения p вариантов решения E_i , получают в результате значение, соответствующее расширенному ММ-критерию.

Обозначим теперь через $E(p)$ обобщенный вариант решения, определяемый с помощью выбора вероятностного вектора $p \in W^m$, а через E — множество всех таких вариантов.

Тогда расширенный ММ-критерий формулируется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 E(p_0) &= E(p_0) \Big| E(p_0) \in \tilde{E} \wedge e(p_0, q_0) = \\
 &= \max_{(p)} \min_{(q)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n e_{ij} p_i q_j,
 \end{aligned}
 \tag{39}$$

где p – вероятностный вектор для E_i , а q – вероятностный вектор для F_j .

Таким образом, расширенный ММ-критерий задается целью найти наиболее выгодное распределение вероятностей на множестве вариантов E_i , когда в многократно воспроизводящейся ситуации ничего не известно о вероятностях состояний F_j . Поэтому предполагается, что F_j распределены наименее выгодным образом.

Из требований, предъявляемых рассмотренными критериями к анализируемой ситуации, становится ясно, что вследствие их жестких исходных позиций они применимы только для идеализированных практических решений. В случаях, когда требуется слишком сильная идеализация, можно одновременно применять поочередно различные критерии. После этого среди нескольких вариантов, отобранных таким образом в качестве оптимальных, приходится все-таки волевым образом выделять некоторое окончательное решение. Такой подход позволяет, во-первых, лучше проникнуть во все внутренние связи проблемы принятия решений и, во-вторых, ослабляет влияние субъективного фактора.

Выбор решения по классическим критериям проиллюстрируем следующим примером.

Пусть некоторое производство фирмы требуется подвергнуть проверке с приостановкой, естественно, ее производства. Из-за этого приостанавливается выпуск продукции. Если же производству фирмы мешает не обнаруженная своевременно неисправность, то это приведет не только к приостановке работы, но и к дополнительным простоям.

Варианты решения таковы:

- E_1 – полная проверка;
- E_2 – минимальная проверка;
- E_3 – отказ от проверки.

Объект может находиться в следующих состояниях:

- F_1 – неисправностей нет;
- F_2 – имеется незначительная неисправность;
- F_3 – имеется серьезная неисправность.

Результаты включают затраты на проверки и устранение неисправности, а также затраты, связанные с потерями в использовании объекта и с повреждением. Они приведены в табл. 16. Согласно ММ-критерию (39), следует проводить полную проверку ($E_0 = \{E_1\}$).

Таблица 16

Варианты решения о проверках фирмы и их оценки (в 10^3) согласно ММ- и DL-критериев для $q_i=0,33$

Вариант решения	Состояние объекта			ММ-критерий		DL-критерий	
	F_1	F_2	F_3	$e_{ir} = \min_j e_{ij}$	$\max_i e_{ir}$	$e_{ir} = \sum_j e_{ij} q_j$	$\max_i e_{ir}$
E_1	-20,0	-22,0	-25,0	-25,0	-25,0	-22,33	
E_2	-14,0	-23,0	-31,0	-31,0		-22,67	
E_3	0	-24,0	-40,0	-40,0		-21,33	-21,33

DL-критерий в предположении, что все состояния машины равновероятны ($q_j=0,33$), рекомендует отказаться от проверки ($E_0 = \{E_1\}$). Применение S-критерия иллюстрирует табл. 17.

Таблица 17

Матрица остатков для примера «Решения о проверках фирмы» и их оценка (в 10^3) согласно S-критерию

Вариант решения	Состояние объекта			S-критерий	
	F_1	F_2	F_3	$e_{ir} = \max_j a_{ij}$	$\min_i e_{ir}$
E_1	+20,0	0	0	+20,0	
E_2	+14,0	+1,0	+6,0	+14,0	+14,0
E_3	0	+2,0	-15,0	+15,0	-21,33

Наш пример сознательно выбран так, что каждый критерий предлагает новое решение. Неопределенность состояния, в котором проверка застает объект СИ, превращается теперь в отсутствие ясности

ти, какому же критерию следовать. Таким образом, мы вроде бы мало что выиграли. Самое большее, можно было бы проверить после этого, не принимают ли величины e_{ij} для какого-нибудь критерия приблизительно равные значения, как, например, $e_{2r} = 14,0 \cdot 10^3$ и $e_{3r} = 15,0 \cdot 10^3$ (табл. 17), рекомендации такого критерия выглядят менее убедительными. Поскольку различные критерии связаны с различными же аспектами ситуации, в которой принимается решение, лучше всего для сравнительной оценки рекомендаций тех или иных критериев получить дополнительную информацию о самой ситуации. Если принимаемое решение относится к сотням машин с одинаковыми параметрами, то целесообразно придерживаться VL-критерия. Если же число реализаций невелико, то больший вес приобретают более осторожные рекомендации S- или MM-критериев.

В области задач менеджмента различные критерии часто приводят к одному результату. Предположим, что в рассматриваемом примере повреждение серьезно. Тогда повреждение (состояние F_3) встречается вдвое чаще, чем любое другое состояние. Тогда VL-критерий, как и MM-критерий, рекомендует полную проверку ($E_0 = \{E_1\}$).

Бывают и такие ситуации, когда все критерии дают одинаковые результаты. Если для нашего примера (см. табл. 15) с помощью соответствующих мероприятий удастся так снизить затраты на полную проверку, что в соответствующей строке мы будем иметь $e_{11} = -18,0 \cdot 10^3$, $e_{12} = -20,0 \cdot 10^3$ и $e_{13} = -22,0 \cdot 10^3$, то все три применявшихся критерия предпишут полную проверку.

Всякий вариант, избираемый в данном случае, является слабо доминирующим. Сильное доминирование имеет место, когда для всех результатов e одного из рассматриваемых вариантов справедливо

$$\begin{aligned} e_{1j} &\leq e_{ij} && \text{для } j = 1, \dots, n \text{ и} \\ e_{1j} &< e_{ij} && \text{хотя бы для одного } j. \end{aligned}$$

Над указанным вариантом E_1 остальные варианты доминируют. Его можно исключить из матрицы решений, так как для всякого F_j он дает худший результат, чем другие.

Если какой-либо вариант E_1 доминирует сильно, т. е. выполняются условия

$$\begin{aligned} e_{1j} &\leq e_{ij} && \text{для } j = 1, \dots, n \text{ и} \\ e_{1j} &< e_{ij} && \text{хотя бы для одного } j, \end{aligned}$$

то даже при отсутствии информации о возможных внешних состояниях F_j никакой проблемы относительно принимаемого решения нет. Для всякого F_j вариант E_1 – наилучший.

По мере развития теории принятия решений в ней сформулировано большое количество производных критериев (критерий Гурвица, критерий Ходжа–Лемана, критерий Гермейера, критерий произведений, гибкий критерий, BL (MM)-критерий и т. д.), поглощающих описанные выше классические критерии выбора решений с их ограниченными областями применения и содержащие в себе эти классические критерии в качестве частных случаев.

Так, стараясь занять наиболее уравновешенную позицию, Гурвиц предложил критерий (HW), оценочная функция которого находится где-то между точками зрения предельного оптимизма (31) и крайнего пессимизма (34):

$$Z_{\text{HW}} = \max_i e_{ir},$$

$$e_{ir} = c \min_j e_{ij} + (1 - c) \max_j e_{ij}. \quad (40)$$

Тогда

$$E_0 = \left\{ E_{i0} \left| E_{i0} \in E \wedge e_{i0} = \max_i \left[c \min_j e_{ij} + (1 - c) \max_j e_{ij} \right] \wedge 0 \leq c \leq 1 \right. \right\},$$

где c – весовой множитель.

Правило выбора, согласно HW-критерию, формулируется нами следующим образом.

Матрица решений $\|e_{ij}\|$ дополняется столбцом, содержащим средние взвешенные наименьшего и наибольшего результатов для каждой строки (40). Выбираются те варианты E_{i0} , в строках которых стоят наибольшие элементы e_{ir} этого столбца.

Для $c=1$ HW-критерий превращается в MM-критерий. Для $c=0$ он превращается в критерий азартного игрока. Отсюда ясно, какое значение имеет весовой множитель c . В менеджменте и организационно-экономических приложениях правильно выбрать этот множитель бывает так же трудно, как правильно выбрать критерий. Вряд ли возможно найти количественную характеристику для тех долей оптимизма и пессимизма, которые присутствуют при принятии решения. Поэтому чаще всего весовой множитель $c=0,5$ без возражений принимается в качестве некоторой «средней» точки зрения.

При обосновании выбора применяют обратный порядок действия. Для пригланувшегося решения вычисляется весовой множитель, и он интерпретируется как показатель соотношения оптимизма и пессимизма. Таким образом, позиции, исходя из которых принимаются решения, можно рассортировать по крайней мере задним числом.

В табл. 18 представлена матрица решений, из которой хорошо видно, что выбор в соответствии с НВ-критерием может, несмотря на вполне уравновешенную точку зрения, приводить к нерациональным решениям. Пример построен так, что оптимальное (согласно НВ-критерию) решение E_0 есть E_1 независимо от весового множителя.

НВ-критерий предъявляет к ситуации, в которой принимается решение, следующие требования:

- о вероятностях появления состояний F_j ничего не известно;
- с появлением состояний F_j необходимо считаться;
- реализуется лишь малое количество решений;
- допускается некоторый риск.

Таблица 18

Пример матрицы решений

	F_1	F_2	F_3	F_4	...	F_{n-1}	F_n
E_1	10000	1	1	1	...	1	1
E_2	9999	9999	9999	9999	...	9999	9999

В целом достоинством производных критериев является повышение надежности принятия решения, что подробно рассматривается в [1, 3, 11].

МЕТОДЫ УЧЕТА И УСТРАНЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ В СИСТЕМНЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Принципиальной особенностью социально-экономических исследований является имманентно присущая ему, как правило, высокая степень неопределенности условий, ограничений и т. д. их проведения [1]. Эта особенность в значительной мере определяет и методологию подготовки исходных данных, и методы моделирования при проведении социально-экономических исследований, и анализ полученных результатов. При этом требуется, чтобы неопределенность была соответствующим образом учтена и по возможности устранена, особенно при обеспечении «гибкости» (адаптации) управленческих решений по результатам исследований по мере получения дополнительной информации о неопределенных факторах при функционировании и развитии социально-экономических систем (СЭС) и социально-экономических процессов в них. Поэтому далее кратко рассмотрим методы учета и устранения неопределенностей в социально-экономических исследованиях и оценки степени реализуемости результатов исследований или принимаемых по ним соответствующих управленческих решений (рис. 31, 32).

Методы учета неопределенностей охватывают полный цикл СИ:

- формирование областей неопределенности параметров, рассматриваемых СЭС и ее компонентов;
- задание исходных данных по условиям использования СЭС, зависящим от выбора параметров исследуемой СЭС;
- разработку методик оценки эффективности, учитывающих неопределенные факторы;
- анализ полученных результатов СИ.

Методы учета неопределенностей предполагают:

- оценку влияния на эффективность неопределенных факторов с известными законами распределения;
- учет активных неопределенных факторов в так называемых конфликтных ситуациях;
- учет пассивных неопределенных факторов с неизвестными законами распределения;

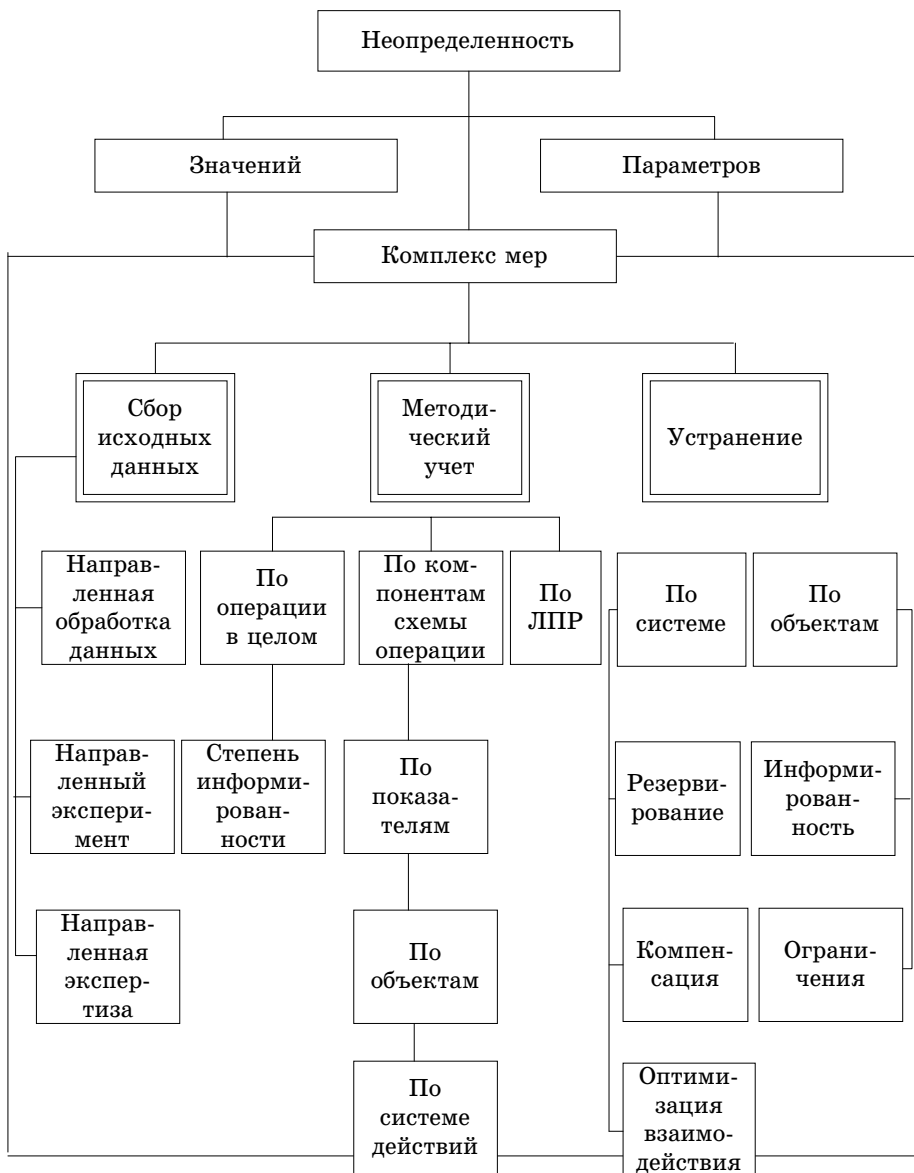


Рис. 31. Комплекс мер анализа неопределенности



Рис. 32. Неопределенность на этапах исследования

– использование специальных методических приемов, таких как проведение равнозначимого анализа параметров, уменьшение числа стратегий, выполнение соответствующего уровня моделей, построение функциональных критериев, проведение усилительного, уравнительного и других видов анализа.

Методы позволяют:

– получить обоснованные выводы по анализу эффективности стратегий СЭС, функционирующих в неопределенных условиях как зависящих от выбора характеристик СЭС, так и не зависящих;

– выработать рекомендации по рациональным управленческим решениям.

Методический учет неопределенности характеризуется тем, что исследователь не влияет на сами неопределенные факторы, а только методически учитывает их в исследовании, а решения по исследуемому компоненту СЭС принимаются исходя из возможности его функционирования во всем диапазоне неопределенных факторов.

Учет неопределенных факторов с известными законами распределения осуществляется на основе методов теории вероятностей, а для учета активных неопределенных условий привлекаются методы теории игр. Характеристика этих методов и особенности их использования на этапе СИ (в общем случае для адаптивных систем) приводятся в [1, 5, 9].

При наличии неопределенных факторов, закон распределения которых неизвестен, приходится иметь дело с принятием решений в условиях неопределенности. Методический учет таких факторов основан на формировании системы специальных критериев, на базе которых принимаются решения. Пассивные неопределенные факторы могут быть заданы набором значений $U_1, U_2, \dots, U_j, \dots, U_n$ либо диапазонами $[U_n, U_k]$.

Если диапазон неопределенного параметра неизвестен, он может быть установлен субъективно либо на основе возможных значений сведен к случаю задания набором значений U_j . Для этого весь диапазон $[U_n, U_k]$ разбивается на n интервалов и для каждого j -го интервала устанавливается среднее значение $U_j, j = 1, n$. Если неопределенные факторы заданы набором возможных значений, то выбор рационального решения производится на основе анализа матрицы вида W , компонентами которой являются показатели эффективности для a_i -го варианта принимаемого решения при возможном варианте неопределенных пассивных условий.

При известном законе распределения неопределенных параметров $P(U_j)$ для каждого из решений a_i можно определить

$$W_i = \sum_{j=1}^n W_{ij} p(U_j)$$

и выбрать рациональное решение исходя из максимального значения «взвешенного» по вероятности показателя

$$\max_T W_T.$$

Однако здесь отдать предпочтение какому-либо варианту условий невозможно, так как распределение неизвестно. Для принятия решения в этом случае используется ряд критериев. Приведем некоторые из них.

Максимальный критерий Вальда, или критерий осторожного наблюдателя, оптимизирует ожидаемый результат в расчете на самые плохие условия. Выбор рационального варианта по этому критерию производится так:

$$V_{\text{рац}} = \max_i \min_j W_{ij}.$$

Критерий минимаксного риска («минимизации сожалений»), или критерий Сэвиджа, как и предыдущий, рассматривается в расчете на наихудшие условия. Однако здесь минимизируют потери эффективности (риск) относительно самого хорошего варианта для различных условий:

$$S_{\text{рац}} = \min_i \max_j \tau_{ij},$$

где τ_{ij} – показатель риска («сожалений»), определяемый зависимостью

$$\tau_{ij} = \max_i W_{ij} - W_{ij}.$$

Критерий Гурвица, или критерий «пессимизма-оптимизма», в отличие от предыдущих, которые ориентируют исследователя на наихудшие условия, позволяет «взвесить» как наихудшие, так и наилучшие условия. Предполагается, что наихудшие условия могут быть с вероятностью y , а наилучшие – с вероятностью $1-y$. При таком условии критерий Гурвица может быть представлен в следующих формах

1. Матрица возможных результатов представлена показателями эффективности W_i :

$$\Gamma_{\text{рац}} = (W) = \max_i \left[\gamma \min_j W_{ij} + (1 - \gamma) \max_j W_{ij} \right].$$

При $y=1$ критерий Гурвица, представленный в этом виде, вырождается в критерий Вальда, т. е. выбор решения производится исходя из наихудших условий: $\Gamma_{\text{рац}}(W) = V_{\text{рац}}$.

2. Матрица возможных результатов представлена показателями риска r_{ij} («сожалений»)

$$\Gamma_{\text{рац}}(r) = \min_i \left[\gamma \max_j r_{ij} + (1 - \gamma) \min_j r_{ij} \right].$$

При $y = 1$ критерий Гурвица, выраженный через показатели риска, вырождается в критерий Сэвиджа

$$\Gamma_{\text{рац}}(r) = S_{\text{рац}}.$$

В критерии Гурвица вероятность наихудших условий γ задается, как правило, субъективно, исходя из опыта с учетом аналогичных ситуаций и т. д. Значение y может определяться также методом экспертных оценок для снижения степени субъективизма. Очевидно, что, чем опаснее оцениваемая ситуация, тем ближе к единице должна быть величина γ , когда гарантируется наибольшее из минимальных значений выигрыша или наименьший из максимальных значений риска.

Кроме рассмотренных критериев, в ряде случаев используют также критерий, при котором предполагается равная вероятность всех вариантов условий, т. е. ситуации неопределенности фактически сводятся к ситуациям риска. В этом случае для выбора рационального варианта могут использоваться приемы «оптимизации в среднем» или «взвешивания по вероятности», а также замена неопределенных параметров их математическими ожиданиями. При использовании первого приема выбор рационального варианта в соответствии с данным критерием может производиться из условия

$$L_{\text{рац}} = \max_i \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n W_{ij}.$$

Анализ рассмотренных критериев показывает, что критерии Вальда и Сэвиджа позволяют выбрать варианты в расчете на получение гарантированного минимального выигрыша или минимальных потерь для наихудших условий. Критерий Гурвица, хотя и «взвешивает» наилучшие и наихудшие условия, однако неопределенность не устраняет, так как показатель y остается неопределенным и объективно установить его обычно не удастся. Критерий, учитывающий равновероятность условий, предполагает сведение ситуации неопределенности к субъективной ситуации риска.

В СИ, например прогнозных, наиболее приемлемым представляется минимаксный критерий Вальда. Однако в ряде случаев этот критерий не позволяет выделить единственного оптимального варианта, т. е. таких вариантов может быть несколько. Тогда для выбора одного из них в качестве наилучшего следует сравнить вторые по величине гарантированные уровни показателей эффективности, затем (если единственность еще не обеспечена) – третьи и т. д. В случае относительно небольшого числа вариантов выбор рационального из них по данному принципу можно осуществить непосредственным сравнением всех вариантов. Если же множество вариантов обширно, то следует обратиться к специальным методам [3, 5].

Задачу выбора решений в условиях неопределенности можно отнести к задаче многокритериальной оптимизации, рассматривая показатель эффективности для множества вариантов условий как векторный. В этом случае для выбора вариантов могут использоваться основы решения лексикографических задач оптимизации (5).

Иногда для значения показателя эффективности удается установить некоторое минимальное требуемое значение $W_{\text{тр}}$ и считать, что, если $W_{ij} < W_{\text{тр}}$, то вариант системы i при значении неопределенного фактора j практически неработоспособен или же совершенно не обеспечивает достижения поставленной цели.

Установление такого требуемого значения лежит в основе принципа сбалансированности, который позволяет из всего диапазона неопределенных условий выделить расчетный диапазон специально для СИ [5, 9]. Тогда вместо исходной матрицы значений показателя эффективности можно рассмотреть новую, элементы которой определяются следующим образом:

$$W_{ij} = \begin{cases} W_{ij}, W_{ij} \geq W_{\text{тр}}, \\ W_{\text{тр}}, W_{ij} < W_{\text{тр}}. \end{cases}$$

Такая замена означает, что в исходной матрице все элементы W_{ij} , меньшие чем $W_{\text{тр}}$, следует заменить на $W_{\text{тр}}$. Можно показать, что такая замена не повлияет на выбор рационального варианта, однако может существенно сократить расчеты, проводимые на основе лексикографической оптимизации. Пример такого преобразования матрицы эффективности может иметь вид

$$\{W_{ij}\} = \begin{vmatrix} W_{11} & W_{\text{тр}} & \dots & W_{ij} & \dots & W_{\text{тр}} \\ W_{\text{тр}} & W_{22} & \dots & W_{\text{тр}} & \dots & W_{2n} \\ W_{\text{тр}} & W_{m2} & \dots & W_{mi} & \dots & W_{\text{мин}} \end{vmatrix}.$$

В преобразованной матрице некоторые столбцы могут оказаться сплошь состоящими из чисел $W_{тр}$. Это будет означать, что соответствующие варианты неопределенных условий особенно неблагоприятны, и при их реализации ни один из вариантов системы не обеспечивает достижение поставленных целей. Следовательно, эти значения неопределенных факторов не должны влиять на выбор рационального варианта, например, развития СЭС.

Тип критерия для выбора рационального варианта в неопределенных условиях, не устранимых адаптивными управленческими решениями, должен быть оговорен на этапе анализа систем, согласован с руководством СЭС и при исследовании предполагается заданным.

Процесс выбора критерия для учета неопределенности достаточно сложен. Устойчивость выбранного рационального варианта можно оценить на основе анализа по нескольким критериям. Если существует совпадение, то имеется большая уверенность в правильности выбора варианта.

Наряду с этими методами для учета неопределенности используются специальные методические приемы: равнозначимый анализ, ограничение числа стратегий, выделение уровня моделей, приемы доминирования, выделение этапов операции, районирование множества векторов, построение рациональных критериев, анализ чувствительности распределения, усилительный анализ, уравнивательный анализ, построение обобщенных показателей, задание ограничений на неопределенные параметры.

Охарактеризуем кратко содержание каждого из указанных приемов.

Равнозначимый анализ основан на выделении групп характеристик в соответствии со степенью их влияния на результат и с учетом достоверности их значений. Неопределенные факторы, слабо влияющие на результат, могут быть вообще исключены из рассмотрения. Это упрощает математическую модель и позволяет снизить неопределенности исходных данных. Равнозначимый анализ предусматривает: определение частных производных показателя результата по неопределенным параметрам; выделение групп параметров равного влияния в данной области исследования; ранжирование групп в порядке убывания степени их влияния; учет в исследовании эффективности, в первую очередь, групп параметров, стоящих на первых местах по степени их влияния.

Ограничение числа стратегий проводится на основе сопоставления степени влияния на эффективность выбора стратегии и неопределенных параметров. Если влияние выбора стратегии сопоставимо

с влиянием неопределенности самих параметров, то такие стратегии могут не рассматриваться. Исключение стратегий из числа рассматриваемых осуществляется сопоставлением разброса W .

Выделение уровней моделей, применяемых в исследовании, проводится в соответствии с обеспеченностью исходными данными и известной степенью их неопределенности. При наличии ряда неопределенных факторов, которые трудно формализовать или каким-то образом учесть в модели, пересматривается уровень такой модели и оценивается возможность СЭС на другом уровне. Например, если характеристики совокупности СЭС не определены, то исследование целесообразно проводить для типовых СЭС (модулей) при вариации характеристик этих СЭС, а в общем случае и средств активной реакции.

Приемы доминирования основаны на выделении условий, в которых система доминирует (имеет наибольшую эффективность), и в построении (хотя бы в теоретическом плане) самой доминирующей системы. Если доминирующий вариант СЭС отсутствует, что имеет место в большинстве практических случаев, то определяются затраты на парирование неопределенных факторов другими средствами.

Выделение этапов операции предусматривает вместо моделирования этапов, имеющих высокую степень неопределенности, задание их выходных параметров в виде исходных данных. Эти параметры могут быть заданы диапазоном возможных значений, для которого определяется устойчивое решение. Так, для СЭС, функционирующей в неопределенных условиях, зависящих от выбора характеристик СЭС, при определении рациональных характеристик можно выделить отдельные этапы и задать их диапазоном вероятности преодоления этого этапа, а конечный этап исследовать более детально. При этом необходимо оценить устойчивость рекомендаций по средствам обслуживания СЭС в заданном диапазоне условий.

Районирование множества векторов применяется, когда функциональные критерии описываются каждый своим вектором некоторого района состояний СЭС. При этом пространство состояний разбивается на области, каждой из которых соответствует один или несколько признаков.

Построение функциональных критериев основано на том, что ряд неопределенностей рассматривается на этапе принятия решения. Примером функционального критерия может служить критерий Гурвица, в котором неопределенность ситуации сведена к заданию коэффициентов относительной важности методами экспертных оценок, что подробно рассмотрено в [3, 5].

Анализ чувствительности распределения используется в тех случаях, когда ситуацию неопределенности можно свести к субъективной ситуации риска. В этом случае варианты субъективного распределения неопределенного фактора могут быть заданы на основе метода экспертных оценок.

Усилительный анализ предполагает сравнение вариантов систем в условиях, неблагоприятных для исследуемой системы и благоприятных для противостоящей системы.

Уравнительный анализ основан на определении условий равной эффективности вариантов систем, с последующим сравнением этих условий.

Построение обобщенных показателей основано на формировании таких показателей сравнения вариантов, которые были бы представительными и приемлемыми в заданной области неопределенности.

Задание ограничений при учете неопределенности предусматривает формирование дополнительных взаимосвязей, которые должны быть учтены в математической модели.

Один из методов формирования ограничения основан на принципе сбалансированности [7], в соответствии с которым ограничение вариантов условий применения при выборе рациональных параметров элемента производится исходя из допустимого уровня решения поставленной задачи системой в целом.

Для анализа неопределенных факторов в последнее время все шире используются экспертные оценки.

Экспертные оценки основаны на получении и обработке информации о неопределенных факторах на основе субъективных мнений квалифицированных специалистов-экспертов. Следует заметить, что субъективизм присущ не только экспертным оценкам, но и прикладным моделям и экспертному СИ (построение модели, проведение эксперимента и их результаты зависят от индивидуальных особенностей исследователя). Отличительной особенностью экспертных оценок является тот факт, что при полном единодушии экспертов – проблема тривиальна, а при расхождении мнений имеет место неопределенность.

Исследования на основе использования строгих формальных правил и набора аксиом обеспечивают строгость результатов. Однако противопоставление строгих формальных и экспертных методов неправомерно, так как на практике используется комбинация этих методов.

Методы устранения неопределенностей. Наряду с методами учета неопределенностей в последнее время получили развитие и все

шире используются в практике СИ методы устранения неопределенностей (рис. 33).

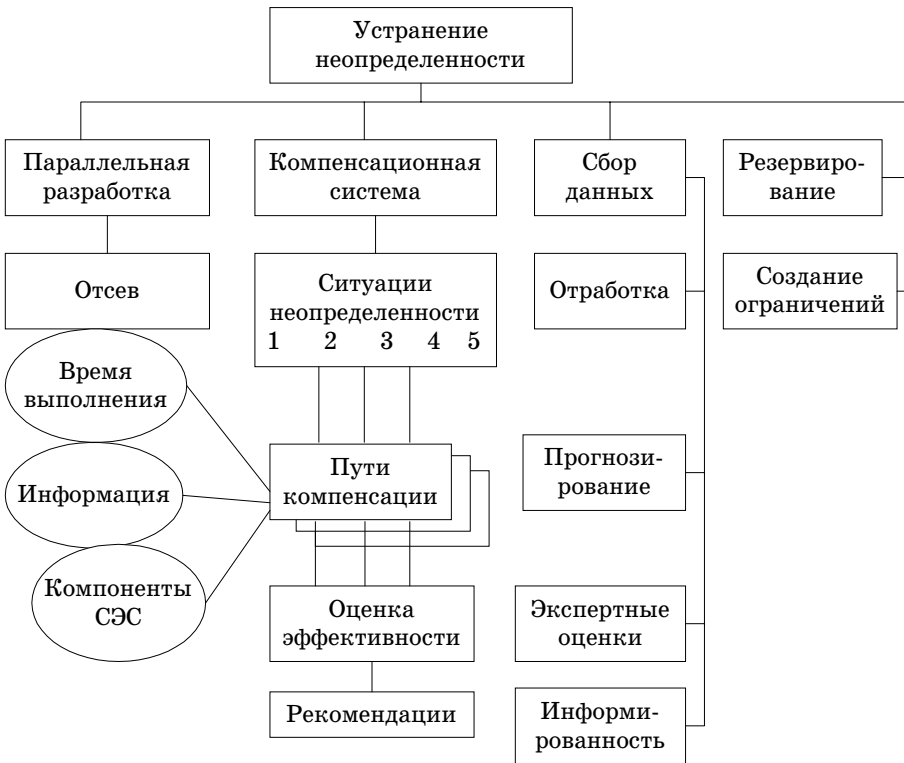


Рис. 33. Метод анализа адаптивных свойств

Эти методы предназначены:

- для анализа возможностей компенсации неопределенности благодаря соответствующим управленческим решениям и выбору рациональных вариантов исследуемых элементов СЭС и СЭС в целом;
- для оценки возможностей адаптации компонентов СЭС в условиях неопределенности.

Эти методы предполагают необходимость поиска, анализа и реализации «гибких» управленческих решений на всех этапах жизненного цикла СЭС с учетом получаемой информации, снижающей неопределенность условий. Методы позволяют вырабатывать обоснованные предложения как в части путей компенсации неопределенности, так и внедрения адаптивных управленческих решений.

Устранение неопределенности может предусматривать:

- параллельную разработку нескольких вариантов исследуемых компонентов СЭС;
- реализацию компенсационных возможностей этих компонентов, специально организованный сбор данных, снижающих неопределенность;
- создание специальных ограничений на условия, зависящих от выбора характеристик СЭС и ее подсистем;
- резервирование (информационное, материальное) по исследуемым компонентам СЭС.

Параллельная разработка направлена на обеспечение разработки нескольких вариантов развития СЭС, оптимальных каждый в своем ограниченном диапазоне условий. Такая разработка допустима при сравнительно небольшой стоимости вариантов поведения системы либо в тех случаях, когда устранение неопределенности другими способами в принципе невозможно.

В дальнейшем по мере уточнения неопределенных факторов часть вариантов поведения систем может быть исключена из разработки и лишь некоторые из исходного множества вариантов доводятся до окончательной разработки. Такой прием, как правило, характерен для разработки вариантов в разных СЭС, так как разрабатываемые варианты имеют тем большую целесообразность, чем существеннее они отличаются друг от друга. Для одной же СЭС типична разработка одного варианта, поэтому в нем необходимо предусмотреть возможность вариации параметров при изменении условий.

Вариация параметров системы и ее компонентов при уточнении неопределенности предполагает реализацию компенсационных возможностей систем.

Специально организованный сбор и обработка данных, снижающих неопределенность, могут рассматриваться как один из методов устранения неопределенности. Особая роль здесь отводится методам обработки ограниченной информации, экспертных оценок, прогнозирования, а также учета степени информированности конкурирующей системы.

Создание ограничений на условия применения, например с целью затруднения функционирования средств активной реакции СЭС, позволяет сузить неопределенность. Материальное резервирование позволяет в последующем использовать заранее предусмотренный резерв для устранения неопределенности по мере поступления соответствующей информации.

Рассмотрим основные пути устранения неопределенности благодаря уточнению параметров путем реализации компенсационных возможностей.

Выбор рациональных путей управленческой компенсации неопределенности на этапе исследования СЭС предусматривает:

- анализ неопределенных условий функционирования СЭС;
- определение возможных путей их управленческой компенсации на основе соответствующих управленческих решений;
- разработку моделей для сравнения эффективности альтернативных вариантов исследуемых компонентов СЭС, реализующих компенсационные возможности.

Анализ неопределенных условий конкретен для систем различного назначения и связан с ранжированием параметров по степеням их неопределенности, которые могут быть представлены пятью ситуациями: определенности, случайности, неопределенности параметра, неопределенности значения параметра и неосведомленности. С позиции реализации компенсационных возможностей, ситуации определенности и неосведомленности не представляют интереса, так как первая не связана с неопределенностью, а для последней практически невозможно ее предусмотреть. Поэтому в плане компенсации неопределенности следует рассматривать в основном вторую, третью и четвертую ситуации.

Для оценки эффективности и выработки рекомендаций по компенсационным управленческим решениям необходим анализ диапазона неопределенности указанных факторов или закона распределения и оценка возможности получения информации о них на последующих этапах жизненного цикла системы. В качестве средств получения информации могут использоваться специальные средства, входящие в состав СЭС.

Управленческие решения, обеспечивающие компенсационные возможности системы, в общем случае зависят от: времени или этапа, на котором реализуется компенсация; компонентов системы, обеспечивающих компенсацию; способов обеспечения компенсации; используемой информации о неопределенных факторах и др.

Поиск возможных путей компенсации целесообразно осуществлять с учетом указанных факторов, которые в общем случае могут отражать основные аспекты системного и операционного подхода [1, 7].

Так, время обеспечения адаптации может охватывать все этапы жизненного цикла СЭС (временной аспект системного подхода), все этапы функционирования СЭС в процессе ее непосредственного функционирования, применения или использования, а также все типовые фазы действий, выполняемых подразделениями СЭС [1, 5].

Компенсационные возможности систем реализуются исходя из принципа максимальной свободы выбора рациональных вариантов действий на каждом этапе функционирования с учетом информации об условиях и предыстории процесса. Обеспечение адаптации на начальных этапах жизненного цикла СЭС предусматривает принятие таких управленческих решений, которые позволят изменять параметры системы при уточнении будущих условий функционирования, использования или применения. К этому же случаю можно отнести совершенствование или модернизацию отдельных компонентов систем, как активную реакцию на изменение условий или совершенствование средств активной реакции объектов. Компенсация такого типа обладает большими резервами времени на ее реализацию и большими социально-экономическими, информационно-техническими возможностями.

На завершающих этапах компенсация связана с изменением параметров в ходе функционирования системы за счет возможностей компенсации неопределенности, предусмотренных на этапах организации или создания СЭС. Наибольшими компенсационными возможностями обладает конечный (завершающий) этап жизненного цикла СЭС, когда в принципе можно получить практически достоверную информацию об условиях и поведении СЭС и устранить неопределенности всех предыдущих этапов.

Пути обеспечения компенсационных возможностей СЭС и ее компонентов рассматриваются с учетом интегративного и коммуникативного аспектов системного подхода. Действительно, пути компенсации выбираются из обеспечения максимальной эффективности системы в целом (интегративность) с учетом неопределенного внешнего окружения (коммуникативность). В общем случае компенсация предусматривает изменение характеристик СЭС в ответ на изменившиеся условия. Изменения характеристик можно добиться самыми различными способами и средствами – от создания набора средств до выбора рациональных способов их применения.

В качестве возможных путей компенсации неопределенности можно выделить разработку и реализацию «гибких» управленческих решений (адаптивных возможностей), оптимальные стратегии использования систем.

Некоторые пути компенсации неопределенности приведены далее.

Метод анализа адаптивных свойств. Одним из перспективных направлений обеспечения инвариантности СЭС в условиях неопределенности является создание адаптивных ее компонентов. Для формирования рациональных путей обеспечения адаптации проводится

сравнение их эффективности методом анализа адаптивных свойств. Этот метод предназначен:

- для сопоставления альтернативных вариантов исследуемого элемента СЭС в диапазоне условий планируемого функционирования;
- для выработки рациональных алгоритмов адаптивного использования компонентов в составе СЭС в зависимости от конкретно сложившихся условий.

Метод анализа адаптивных свойств компонентов СЭС предполагает возможность получения дифференцированных оценок эффективности всех компонентов СЭС во всем диапазоне неопределенности условий с учетом адаптивных возможностей.

Метод позволяет выработать рекомендации по наиболее предпочтительным направлениям обеспечения адаптации и выделить области условий преимущественного использования того или иного варианта, например, при развитии СЭС.

Особенностью получения оценок эффективности для адаптивных систем является учет возможности изменения параметров $\{a\}$ в зависимости от конкретной реализации комплекса условий $\{\beta\}$ для обеспечения максимальной эффективности СЭС именно для данных условий. Зависимость показателя эффективности W системы от параметров исследуемого элемента подсистемы СЭС и неопределенных условий применения определяется ММ функционирования СЭС в процессе решения поставленной задачи:

$$W = W(\{a\}, \{\beta\}).$$

Предположим, что для адаптивной системы обеспечено множество допустимых управлений A ее параметрами в условиях неопределенности. Выделим множество всевозможных ситуаций B , характеризующих варианты условий функционирования СЭС. Тогда определение показателя эффективности адаптивной системы будет состоять в отыскании оператора преобразования $B \rightarrow A$, который каждому элементу множества B ставит в соответствие элемент множества A , характеризующий вариант использования адаптивного исследуемого элемента СЭС. При этом обеспечивается экстремальное значение показателя эффективности

$$W_a = [\{a\} a(\{\beta\}), \{\beta\}] \rightarrow \text{extr.}$$

Определив взаимосвязь $\{a\} a(\{\beta\})$, устанавливают зависимость показателя эффективности адаптивной системы в диапазоне неопределенности $W_a = W_a\{\beta\}$. Решение этой задачи может проводиться методами математического программирования. Такая зависимость служит основой для проведения анализа адаптивных свойств СЭС в

неопределенных условиях функционирования. Этот анализ предполагает сравнение эффективности рассматриваемых вариантов исследуемых СЭС. Подходы к сравнению зависят от ситуации неопределенности.

В тех ситуациях, когда неопределенные факторы заданы распределением, например, в виде ряда или плотности распределения, сравнение вариантов может быть проведено по математическому ожиданию показателя эффективности

$$W_a = \sum_j W_a(\beta_j)P(\beta_j)$$

или

$$W_a = \int_{-\infty}^{\infty} W_a(\beta)f(\beta)d\beta,$$

где $W_a(\beta_j)$, $W_a(\beta)$ – значения показателей эффективности для условий β_j и β , определенные с учетом возможностей адаптации СЭС относительно конкретных условий; $P(\beta_j)$ – ряд распределения случайной величины β_j ; $f(\beta)$ – плотность распределения случайной величины β .

Представленные зависимости показателей эффективности должны быть определены для каждого из рассматриваемых вариантов управленческих решений $\{a\}$, и на основе их сравнения выбран рациональный из условия

$$\max_{\{a\}} W_a.$$

В ситуациях, когда неопределенные факторы определены только диапазоном возможных значений, используются специальные критерии принятия решений в условиях неопределенности. Для формирования таких критериев необходимо получить значения показателя эффективности W_{ij} для различных сравниваемых вариантов компонентов системы $\{a_i\}$, $i=1, m$ и вариантов условий $\{\beta_j\}$, $j=1, n$. Следует заметить, что использование этих критериев связано с присутствием субъективных факторов уже в самой формулировке критериев. Поэтому для сравнения адаптивных систем они используются как вспомогательные.

Анализ адаптивных свойств системы предусматривает ее сравнение с аналогичными «жесткими» системами, не обладающими возможностью адаптации. Сравнительная оценка проводится на основе анализа типовой зависимости $W(\{\beta\})$. При этом варианты условий должны быть представлены в виде одного обобщенного параметра B

и упорядочены по мере их ухудшения с позиции исследуемой системы. В общем случае можно выделить четыре типовых варианта систем: адаптивный; жесткий, создаваемый исходя из наиболее благоприятных и наиболее сложных условий функционирования; оптимальный только в одной (каждая в своей) точке условий (этот условный идеальный случай вводится для сравнения с другими системами как предельно достижимые возможности) и гибкий [1, 7, 9].

Эффективность системы, создаваемой в расчете на благоприятные условия, обычно снижается с ухудшением условий. Система, ориентированная в расчете на наиболее сложные условия, характеризуется нерациональным распределением ресурсов при других условиях, и ее эффективность в этой области существенно ниже по сравнению с оптимальным распределением ресурсов. С учетом всего диапазона условий адаптивная система может оказаться наиболее рациональной. В общем случае эффективность адаптивной системы несколько ниже относительно идеальной зависимости. Это связано с тем, что реализация адаптивных возможностей может потребовать выделения дополнительных затрат ресурсов.

Для анализа адаптивных свойств в условиях неопределенности могут использоваться две группы показателей. Показатели *первой группы* позволяют сопоставить диапазоны неопределенности, в которых один вариант относительно другого имеет преимущество по эффективности. Показатели *второй группы* обеспечивают сравнение вариантов непосредственно по уровню их эффективности в некоторых особых точках либо в диапазоне неопределенности.

Для получения показателей эффективности выделяют:

– диапазон условий, в котором адаптивный вариант превосходит по эффективности два других предельных варианта «жестких» систем $[B_a]$;

– диапазоны условий, в которых адаптивный вариант превосходит по эффективности жесткий для благоприятных $[B_b]$ и для сложных $[B_c]$ условий.

С учетом этого могут быть получены показатели, например, следующего вида:

– относительный диапазон безусловной предпочтительности адаптивного варианта

$$\bar{B}_a = \frac{[B_a]}{B_k - B_n}$$

Здесь и в дальнейшем индексами «а», «б», «с» обозначены адаптивный вариант и жесткие, ориентированные на благоприятные и сложные условия, соответственно.

– относительный диапазон предпочтительности адаптивного варианта по сравнению с монопараметрическим, создаваемым для благоприятных условий:

$$\bar{B}_6 = \frac{[B_6]}{B_k - B_n};$$

– относительный диапазон предпочтительности адаптивного варианта по сравнению с жестким, создаваемым для наиболее сложных условий:

$$\bar{B}_c = \frac{[B_c]}{B_k - B_n}$$

B_k, B_n – предельные точки диапазона функционирования СЭС.

В качестве показателей второй группы могут использоваться:

– соотношение экстремальных разностей эффективности сравниваемых вариантов

$$\Delta W_{\text{extr}} = \frac{\max_B (W_a - W_c)}{\min_B (W_a - W_c)};$$

– средневзвешенная оценка прироста эффективности (предполагается равновероятность распределения условий)

$$\Delta W = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [W_a(\beta_j) - W_c(\beta_j)]$$

или

$$\frac{1}{B_k - B_k} \int_{B_k}^{B_k} [W_a(B) - W_c(B)] aB;$$

– максимальный выигрыш и проигрыш по эффективности адаптивной системы относительно жесткой

$$\Delta W^+ = \max_B (W_a - W_c);$$

$$\Delta W^- = \left| \min_B (W_a - W_c) \right|.$$

При сравнении адаптивных и жестких вариантов необходимо учитывать дополнительные затраты, связанные с реализацией адаптивных возможностей. С этой целью и в качестве показателей сравнения можно использовать стоимость выполнения системной задачи.

Например, предполагая независимость использования некоторых средств, сопоставление затрат можно представить в виде

$$\frac{C_a}{C_{б(с)}} = \frac{1\partial [1 - P_a(B)]}{1\partial [1 - P_{б(с)}(B)]},$$

где C_a , $C_{б(с)}$ – стоимость применения одного средства, соответственно, для адаптивной и жестких систем; P_a , $P_{б(с)}$ – вероятность выполнения задачи в условиях В одним средством тех же систем.

Метод анализа адаптивных свойств предполагает необходимость учета в ММ $W_a = (\{a\}, \{\beta\}, \{U\})$ возможностей адаптации СЭС в будущем, а реализация адаптивных возможностей, как правило, требует дополнительных затрат ресурсов. Поэтому принципиальным вопросом в этом плане является анализ социально-экономических и информационно-технических решений с учетом возможных дополнительных затрат и степени реализуемости адаптивных возможностей СЭС.

Метод оценки степени реализуемости. Анализ эффективности в процессах исследований СЭС и их стратегического планирования обеспечивает как соответствующую оценку планируемых управленческих решений, так и выработку рекомендаций по рациональным подходам к реализации социально-экономического, информативно-технического варианта, воплощаемого в будущем «в жизнь». Получаемые при этом оценки эффективности могут быть обеспечены с некоторой вероятностью, которая характеризует степень реализуемости, например, варианта мероприятий стратегического плана или всего плана в целом. Получение такого показателя основывается на методе оценки реализуемости, который предназначен для:

- определения количественной меры, характеризующей реализуемость эффективности прогнозируемого варианта управленческого решения (мероприятия) в рамках стратегического плана СЭС;
- проведения анализа устойчивости принимаемых управленческих стратегических решений на основе количественной оценки прогнозируемых показателей эффективности с учетом их реализуемости;
- выработки рекомендаций по устранению «узких мест» с целью повышения степени реализуемости.

Метод оценки степени реализуемости предполагает:

- сбор объективных данных по СЭС как объекту прогнозного СИ стратегического планирования, реакция от других СЭС и условиям первой и второй групп;
- оценку степени риска ЛПР;
- экспертную оценку степени реализуемости на основе полученных объективных данных и оценки степени риска.

Метод оценки степени реализуемости позволяет:

- представить ЛПР объективную информацию о значениях показателей эффективности и возможностях их достижения;
- представить ЛПР необходимые данные для корректировки этих моделей на последующих итерациях планирования или СИ;
- разработать совокупность мероприятий по повышению степени реализуемости эффективности.

Оценка реализуемости полученных значений показателей эффективности (вместо представления интервала их значений) позволяет также координировать деятельность широкой кооперации ЛПР с ориентацией на обеспечение заданных значений этих показателей.

Степень реализуемости P_w значений показателя эффективности является комплексной количественной оценкой, характеризующей:

- возможность реализации прогнозируемых параметров элемента и других компонентов системы, определяющих эффективность деятельности СЭС;
- точность прогнозирования будущих условий применения первой и второй групп;
- обоснованность предпосылок и допущений, принимаемых при построении модели деятельности СЭС;
- полноту учета факторов и реакций, определяющих эффективность СЭС.

Степень реализуемости показателей эффективности в общем случае может быть представлена в виде функции следующих объективных данных: определяющих возможность развития системы с требуемыми характеристиками $J_{тр}$; по условиям первой группы $J_{Iгр}$, зависящим от выбора характеристик системы; по условиям второй группы $J_{IIгр}$, не зависящим от выбора характеристик системы; степени риска ρ :

$$P_w = P_w(J_{тр}, J_{Iгр}, J_{IIгр}, \rho_{Iгр}, \rho_{IIгр}).$$

Следует заметить, что показатель P_w , определяемый большим числом трудноформализуемых факторов, может быть получен с привлечением соответствующих методов экспертных оценок [5].

Объективные данные, определяющие возможность развития системы с требуемыми характеристиками, включает информацию:

- по имеющему заделу исследовательских и танируемых работ, необходимому для реализации системы;
- по располагаемым информационно-технической и социально-экономической базам с учетом возможности создания кооперации,

необходимой для реализации проекта развития СЭС и обеспечения требуемых параметров других компонентов СЭС в целом;

– по кадровому обеспечению СЭС специалистами и исполнителями их кооперации.

Повышение реализуемости проектов развития СЭС, как правило, связано с выполнением работ по улучшению объективных данных в $J_{\text{тр}}$ в части реализации:

– СИ и экспериментов, обеспечивающих необходимый задел к установленному сроку;

– системы мероприятий по требуемому развитию материально-технической базы в условиях широкой кооперации;

– направленной подготовки специалистов и решения задач кадрового обеспечения СЭС.

Выполнение этих работ связано с затратами экономического и временного характера, которые должны быть соответствующим образом учтены при проведении оценок. Информация о необходимости и возможности проведения этих работ $J_{\text{тр}}$, обработанная соответствующим образом, представляется экспертам для получения экспертных заключений.

Объективные данные по условиям, зависящим от выбора характеристик системы, характеризуются следующей совокупностью параметров:

– исходным объемом информации об этих условиях;

– степенью информированности конкурирующей системы о параметрах проектируемой СЭС $J_{\text{тр}}$ (для случая функционирования СЭС в конфликтных ситуациях);

– точностью прогноза отдельных параметров этих условий:

$$|\beta_j^H, \beta_j^K|, \text{ т. е. } J_{\text{Игр}} = \left\{ \bar{J}_{\text{исхИгр}}, \bar{J}_{\text{тр}} [\beta_j^H, \beta_j^K] \right\}.$$

Объективные данные по условиям, не зависящим от выбора характеристик системы, задаются:

– для контролируемых факторов – распределением их параметров (функцией или плотностью распределения): $F(U_j < U)$ или $f(U)$;

– для неконтролируемых – диапазоном возможных значений:

$$[U_j^H, U_j^K], \text{ т. е. } J_{\text{Игр}} = \left\{ F(U_j < U) \vee f(U), [U_j^H, U_j^K] \right\}.$$

Для облегчения экспертизы информация по независимым условиям должна содержать перечни параметров: не зависящих ни от одной из сторон, участвующих в деле; зависящих от какой-либо из сторон, как в части возможности их управления, так и выбора соответствующих условий или навязывания их противостоящей сторо-

не. Например, возможность выбора времени года, суток, места и т. д. функционирования определит эту группу условий.

Степень риска характеризует возможные исходы, при которых СЭС может развиваться не с теми характеристиками, которые планировались, а в более поздние сроки и с большими затратами ресурсов. Она определяется:

– возможностью организации требуемой кооперации СЭС $\{\pi_k\}$;

– социально-экономическими и информационно-техническими мощностями СЭС $\{\pi_m\}$;

– возможностями реализации сетевых планов-графиков развития СЭС $\{\pi_{с.п-г}\}$, т. е. $\rho = \rho(\{\pi_k\}, \{\pi_m\}, \{\pi_{с.п-г}\})$.

Степень риска исследователя отражает возможность снижения его эффективности деятельности СЭС из-за невыполнения отдельных требований по уровню достигнутых характеристик $\{\Delta\tau\}$ за счет использования системы в других непредвиденных условиях $\{\bar{U}, \bar{\beta}\}$, что может быть связано со сдвигом сроков и с неточностью их прогнозирования. Таким образом:

$$\rho = \rho[\{\Delta\tau\}, \{U, \beta\}].$$

Следует отметить, что вся информация, представляемая для получения оценки степени реализуемости, является взаимосвязанной. Экспертные оценки могут быть получены экспертами [5]. В любом математическом моделировании неизбежно присутствуют субъективные факторы, связанные с умением выбрать наиболее существенные аспекты, с использованием того или иного математического аппарата, выбором итераций и т. д. Основными методами экспертных оценок являются: мнения квалифицированных специалистов различного профиля (социологов, экономистов, исследователей, экологов и т. д.); научное обобщение индивидуальных мнений экспертов для выработки объективного суждения по интересующему вопросу.

Использование метода экспертных оценок для определения степени реализуемости предполагает:

– неформализованный учет накопленного опыта по аналогичным СЭС;

– специальную подготовку информации для экспертов, стимулирующей генерирование правильных мнений;

– необходимость и важность специального обучения экспертов;

– необходимость экспертных оценок степени риска (функции потерь) и доверия в условиях неопределенности;

- анализ реализуемости новых управленческих решений;
- учет накопленного опыта по каждой составляющей $J_{тр}$, J_{igr} ,

J_{igr} , ρ_{igr} , ρ_{igr} ;

– использование интуиции эксперта при постановке его на место ЛПР по конкурирующей системе.

Проведение экспертных оценок базируется на следующих основных моментах:

– декомпозиции рассматриваемой общей проблемы при выделении частных в соответствии с рассматриваемыми группами параметров;

– представлении информации о системе в соответствии с оператором $O < \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6 >$, где O – объект распознавания по шести крупным группам его признаков: 1) характеризующих финансово-экономические и хозяйственные свойства, качества объекта – Π_1 ; 2) характеризующих информационно-технические свойства и качества объекта – Π_2 ; 3) характеризующих информационно-технические свойства и качества полей объекта – Π_3 ; 4) пространственные, характеризующие координаты объектов в пространстве, их производные, структуру, функции объекта и др., – Π_4 ; 5) характеризующие наличие определенной связи между объектами распознавания – Π_5 ; 6) временные характеристики, характеризующие изменения признаков и объектов в целом во времени, – Π_6 ;

– обоснованном суждении о частных проблемах соответствующих экспертов – специалистов по данной проблеме;

– обеспечении коллективности мнения;

– свертывании частных суждений в общее. При этом свертывание предполагает объединение мнений о частных проблемах для суждения о проблеме в целом, а также обобщение нескольких независимых мнений групп экспертов в согласованное общее мнение;

– представлении результатов.

Если диапазон значений параметра, указанных экспертами, включает истинное значение, то совокупность мнений корректно может быть синтезирована в некоторое обобщенное мнение, близкое к реальному значению. В этом плане особую значимость приобретает построение всей совокупности мнений. Для согласования индивидуальных мнений экспертов и повышения точности результатов может производиться несколько туров опроса с последовательным обучением экспертов.

Объект экспертизы должен быть представлен наиболее полной располагаемой информацией с максимальным исключением нефор-

мализуемых признаков и свойств. Эксперты должны обладать компетентностью в исследуемой области, эрудированностью в смежных областях, объективностью, заинтересованностью, независимостью, деловитостью, специальной подготовкой и тренировкой в целях экспертизы, способностью к выделению главного и творческого решения задачи, способностью предсказывать будущее состояние объекта, противопоставлять массовому мнению свое собственное, видеть проблему с различных точек зрения и т. д.

Обработка экспертных заключений базируется на современных математических методах обработки информации [6, 8]. Обобщенная оценка и представление результатов должны учитывать индивидуальные особенности ЛПП [4].

При этом в общем виде распознавание объектов можно представить как сравнение их признаков с признаками одного или нескольких аналогов «эталонов», заранее определенных для каждого вида, класса, типа, и отнесение объекта к тому или иному эталону, т. е. классу. Признаки, по которым производится распознавание, могут быть детерминированными или вероятностными.

Детерминированными считаются такие признаки, для которых существует взаимно однозначное соответствие между классом объекта и значением признака. Такие признаки могут быть количественными или качественными. Для детерминированных количественных признаков существует взаимно однозначное соответствие между интервалом, в который попадают измеренные значения признака, и классом объекта. Области M_i в пространстве детерминированных количественных признаков, соответствующие объектам A_i , $i = \overline{1, n}$, фиксированы и не пересекаются друг с другом. Для случая детерминированных качественных признаков их классам соответствуют уже не области, а точки в пространстве признаков, не совпадающие друг с другом. Границы областей в пространстве детерминированных признаков представляют собой априорную информацию, необходимую для распознавания объектов в данном случае.

Вероятностными считаются такие признаки, значения которых для объектов одного и того же класса случайны, а области возможных значений признаков для объектов различных классов могут пересекаться. Случайный характер таких признаков может быть связан либо с их физической природой, либо с погрешностями измерений с помощью средств получения информации. При вероятностных признаках в качестве априорной информации для распознавания объектов могут использоваться условные плотности распределе-

ния признаков $f_i(x/A_i)$ для каждого из объектов, а также априорные вероятности появления объекта каждого класса. Обработка информации в интересах распознавания базируется на байесовском подходе [8].

Необходимо отметить, что в процессе СИ данные непрерывно уточняются. Это связано как с широкой кооперацией исследователей, так и с длительным периодом разработки современных СЭС, т. е. на этапе СИ имеет место объективное устранение неопределенности, которое можно представить как процесс. В связи с этим в процессе СИ и уточнения неопределенных факторов следует предусматривать принятие корректирующих управленческих решений.

Степень реализуемости также будет непрерывно уточняться, и ее оценку следует проводить по всем этапам СИ системы для выработки мероприятий, повышающих степень реализуемости проекта. К числу таких мероприятий можно отнести дублирование СИ, запараллеливание работ, создание резервных компонентов и т. д. Динамический характер оценки степени реализуемости позволяет отслеживать «узкие» места и своевременно выполнять соответствующие мероприятия, обеспечивающие высокий уровень этого показателя.

Библиографический список

1. *Муравьев А. И., Мирзоев Р. Г., Харченко А. Ф.* Информатизация научных исследований в экономике: общие положения / СПбГУЭФ. СПб., 1998. Ч. I. 290 с.
2. *Мирзоев Р. Г., Минько Э. В., Дмитриев Н. Н.* Управление маркетингом: Учеб. пособие / СПбГУАП. СПб., 1997. 144 с.
3. *Муравьев А. И., Мирзоев Р. Г., Харченко А. Ф.* Информатизация научных исследований в экономике: методологические основы инструментария СИ / СПбГУЭФ. СПб., 1999. Ч. III. 260 с.
4. *Мирзоев Р. Г.* Методология интеллектуальной деятельности в менеджменте и маркетинге: Учеб. пособие / СПбГУАП. СПб., 1997. 105 с.
5. Информатизация научных исследований в экономике: инструментарий СИ в экономике / Под ред. *А. Ф. Харченко*; СПбГУЭФ. СПб., 1999. Ч. IV. 285 с.
6. *Захарченко Н. Н.* Эконометрические измерения: теории и методы / СПбГУЭФ. СПб., 1993. 157 с.
7. *Громова Н. В., Минько Э. В., Прохоров В. И.* Методы исследования операций в моделировании организационно-экономических задач: Учеб. пособие / МАИ. М., 1992. 240 с.
8. *Богородская Н. А.* Экономическая статистика: Текст лекций / СПбГУАП. СПб., 1996. 111 с.
9. *Мирзоев Р. Г., Колесников А. М.* Методология принятия решений в менеджменте и маркетинге: Учеб. пособие / СПбГУАП. СПб., 1997. 126 с.
10. *Моргенштерн Х. Ф.* Красота фракталов. М.: Прогресс, 1996. 340 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
<i>Глава I</i>	
ЦЕЛЕПОЛАГАНИЕ	6
<i>Глава II</i>	
ПОДБОР СРЕДСТВ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ	30
<i>Глава III</i>	
ПРОБЛЕМНЫЕ СИТУАЦИИ И ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ	48
<i>Глава IV</i>	
ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	59
<i>Глава V</i>	
ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕ- ЛЕЙ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	73
<i>Глава VI</i>	
ФОРМИРОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ .	84
<i>Глава VII</i>	
СИНТЕЗ МНОЖЕСТВА АЛЬТЕРНАТИВ И ИХ УПОРЯДОТО- ЧЕНИЕ	91
<i>Глава VIII</i>	
РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕ- ШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ	104
<i>Глава IX</i>	
КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ПРИНЯТИЕ УПРАВ- ЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ИНФОР- МАЦИИ, НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ И РИСКА	133
<i>Глава X</i>	
МЕТОДЫ УЧЕТА И УСТРАНЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ В СИСТЕМНЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ	153
Библиографический список	178

Учебное издание

Мирзоев Рустам Гусейнович
Харченко Анатолий Федосеевич

**ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ
СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Учебное пособие

Редактор *А. Г. Ларионова*
Компьютерная верстка *Н. С. Степановой*

Лицензия ЛР № 020341 от 07.05.97. Сдано в набор 14.03.00. Подписано в печать 27.04.00. Формат 60×84 1/16. Бумага тип. № 3. Печать офсетная. Усл. печ. л 10,5. Усл. кр.-отт. 10,6. Уч.-изд. л. 11,25. Тираж 200 экз. Заказ №

Редакционно-издательский отдел
Сектор компьютерных издательских технологий
Отдел оперативной полиграфии
СПбГУАП
190000, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67