

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

*В. И. КУРЕНКОВ*

## ВВЕДЕНИЕ В ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по специальности 160400 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2014

Рецензенты:

главный научный сотрудник ГНП РКЦ «ЦСКБ - Прогресс», заслуж. деятель науки и техн. РФ, лауреат Ленинской премии, д-р техн. наук, проф. А. В. Соллогуб;

доцент кафедры информационных систем и технологий СГАУ, канд. техн. наук Б. А. Есипов.

*Куренков В. И.*

К93 **Введение в эффективность технических систем: учеб. пособие**  
*/ В. И. Куренков. – Самара: Изд-во СГАУ, 2014. – 204 с.*

ISBN 978-5-7883-0968-2

Приведены сведения о концептуальных и методологических основах исследования эффективности технических систем. Рассматриваются основные понятия, связанные с исследованием операций, принципы исследования целенаправленных процессов, задачи исследования эффективности технических систем. Обсуждаются методы оценивания и исследования эффективности функционирования технических систем, методы построения математических моделей операционного комплекса.

Учебное пособие иллюстрируется примерами, относящимися к исследованию эффективности ракетно-космической техники и их систем.

Предназначено для подготовки студентов высших учебных заведений РФ, обучающихся по специальности 230301 «Моделирование и исследование операций в организационно-технических системах» и изучающих дисциплину «Методы исследования операций организационно-технических систем», и по специальности 160400.65 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов» специализации «Моделирование и информационные технологии проектирования ракетно-космических систем», а также молодым специалистам ракетно-космической отрасли.

Подготовлено на кафедре космического машиностроения СГАУ.

УДК 621.8(075)  
ББК 39.62

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....                                                                            | 8  |
| ПРЕДИСЛОВИЕ .....                                                                                  | 9  |
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                     | 10 |
| 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ .....                                                   | 12 |
| 1.1. Сложность систем .....                                                                        | 12 |
| 1.2. Основы системного подхода .....                                                               | 13 |
| 1.3. Аспекты исследования технических систем .....                                                 | 16 |
| 1.4. Задачи оценивания эффективности технических систем .....                                      | 19 |
| 1.5. Иерархические уровни исследования эффективности .....                                         | 21 |
| 1.6. Исследование операций .....                                                                   | 22 |
| 1.7. Условия применения систем и способы использования<br>активных средств в операции .....        | 26 |
| 1.7.1. Факторы, формирующие условия функционирования<br>систем .....                               | 26 |
| 1.7.2. Факторы, определяющие способы использования<br>активных средств управления в операции ..... | 27 |
| 1.7.3. Факторы, формирующие результат операции .....                                               | 29 |
| 1.8. Эффективность операции .....                                                                  | 30 |
| 1.8.1. Эффективность технических систем .....                                                      | 30 |
| 1.8.2. Показатели и критерии эффективности .....                                                   | 32 |
| 1.8.3. Методологические подходы при исследовании<br>эффективности .....                            | 34 |
| 1.9. Эффективность и надежность .....                                                              | 35 |
| 2. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ<br>В ТЕХНИКЕ .....                                          | 40 |
| 2.1. Классификация факторов .....                                                                  | 40 |
| 2.2. Нечёткие множества и функции принадлежности .....                                             | 43 |
| 2.3. Перевод неопределенных факторов в разряд случайных .....                                      | 45 |
| 2.4. Функция принадлежности в виде лингвистической<br>переменной .....                             | 47 |
| 3. ШКАЛЫ И ДОПУСТИМЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ<br>ПОКАЗАТЕЛЕЙ .....                                          | 49 |
| 3.1. Проблема преобразований в различных шкалах .....                                              | 49 |
| 3.2. Измерения показателей .....                                                                   | 50 |
| 3.3. Сравнение показателей .....                                                                   | 51 |
| 3.4. Типы шкал .....                                                                               | 52 |
| 3.4.1. Номинальная шкала .....                                                                     | 53 |
| 3.4.2. Порядковая шкала .....                                                                      | 54 |
| 3.4.3. Шкала интервалов .....                                                                      | 55 |
| 3.4.4. Шкала отношений .....                                                                       | 55 |
| 3.4.5. Абсолютная шкала .....                                                                      | 56 |
| 3.5. Проблема адекватности числовых утверждений .....                                              | 56 |

|                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.6. Выбор шкалы .....                                                                                                                                               | 57 |
| 3.7. Прямые и косвенные измерения .....                                                                                                                              | 59 |
| 4. ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ .....                                                                                                                                    | 61 |
| 4.1. Требования к показателям эффективности и меры выражения<br>результата.....                                                                                      | 61 |
| 4.1.1. Требования к показателям эффективности .....                                                                                                                  | 61 |
| 4.1.2. Измеримость показателей.....                                                                                                                                  | 62 |
| 4.1.3. Соответствие показателя эффективности системе<br>предпочтений ЛПР .....                                                                                       | 63 |
| 4.1.4. Векторные показатели эффективности.....                                                                                                                       | 64 |
| 4.2. Формы показателя эффективности .....                                                                                                                            | 65 |
| 4.2.1. Показатель среднего результата.....                                                                                                                           | 65 |
| 4.2.2. Показатель эффективности как вероятность случайного<br>события.....                                                                                           | 67 |
| 4.2.3. Показатель эффективности как вероятностная гарантия<br>выполнения поставленной задачи .....                                                                   | 67 |
| 4.2.4. Показатель эффективности как вероятностно-<br>гарантированный результат .....                                                                                 | 69 |
| 4.2.5. Показатель эффективности при случайных величинах<br>полученного и требуемого результатов .....                                                                | 70 |
| 4.2.6. Показатель эффективности как средняя мера<br>превышения случайной величины полученного результата над<br>неопределённой величиной требуемого результата ..... | 73 |
| 4.2.7. Показатель рассеяния результатов .....                                                                                                                        | 74 |
| 4.2.8. Показатели среднего риска.....                                                                                                                                | 77 |
| 4.2.9. Показатель эффективности для конфликтных ситуаций.....                                                                                                        | 80 |
| 4.3. Показатели эффективности космической системы<br>наблюдения .....                                                                                                | 81 |
| 5. КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ .....                                                                                                                                      | 85 |
| 5.1. Концепции рационального поведения .....                                                                                                                         | 85 |
| 5.1.1. Концепция пригодности.....                                                                                                                                    | 86 |
| 5.1.2. Концепция оптимизации .....                                                                                                                                   | 86 |
| 5.1.3. Концепция адаптивизации .....                                                                                                                                 | 87 |
| 5.2. Критерии в рамках концепции пригодности.....                                                                                                                    | 88 |
| 5.2.1. Критерий приемлемого результата .....                                                                                                                         | 88 |
| 5.2.2. Критерий допустимой гарантии .....                                                                                                                            | 88 |
| 5.2.3. Критерий допустимого гарантированного результата .....                                                                                                        | 89 |
| 5.3. Критерии в рамках концепции оптимизации .....                                                                                                                   | 89 |
| 5.3.1. Критерий наибольшего результата .....                                                                                                                         | 89 |
| 5.3.2. Критерий наибольшего среднего результата .....                                                                                                                | 89 |
| 5.3.3. Критерий наибольшей вероятностной гарантии<br>результата.....                                                                                                 | 90 |
| 5.3.4. Критерий наибольшего гарантированного результата.....                                                                                                         | 92 |
| 5.3.5. Критерий эффективности в условиях конфликта .....                                                                                                             | 93 |
| 5.4. Критерии в рамках концепции адаптивизации .....                                                                                                                 | 94 |
| 5.4.1. Принцип селекции .....                                                                                                                                        | 94 |
| 5.4.2. Принцип свободы выбора решений .....                                                                                                                          | 94 |
| 5.4.3. Принцип самообучения.....                                                                                                                                     | 94 |
| 5.4.4. Математическая формулировка критерия адаптивности .....                                                                                                       | 95 |
| 5.5. Критерии эффективности космической системы наблюдения.....                                                                                                      | 95 |

|                                                                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.5.1. Иерархическая структура критериев синтеза космической системы наблюдения.....                         | 95         |
| 5.5.2. Обобщенные критерии эффективности.....                                                                | 96         |
| 5.5.3. Основные критерии эффективности.....                                                                  | 97         |
| 5.5.4. Частные критерии эффективности.....                                                                   | 98         |
| 5.6. Векторные критерии.....                                                                                 | 99         |
| 5.6.1. Многокритериальные задачи.....                                                                        | 99         |
| 5.6.2. «Свёртка критериев».....                                                                              | 102        |
| <b>6. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ В ТЕХНИКЕ.....</b>                                        | <b>105</b> |
| 6.1. Принципы усложняющегося поведения систем.....                                                           | 105        |
| 6.1.1. Принцип вещественно-энергетического баланса.....                                                      | 105        |
| 6.1.2. Принцип гомеостаза.....                                                                               | 106        |
| 6.1.3. Принцип выбора решений.....                                                                           | 107        |
| 6.1.4. Принцип перспективной активности.....                                                                 | 107        |
| 6.1.5. Принцип рефлексии.....                                                                                | 107        |
| 6.2. Методологические уровни исследования эффективности технических и организационно-технических систем..... | 108        |
| 6.2.1. Элементный уровень «состав-свойства».....                                                             | 109        |
| 6.2.2. Уровень агрегатов (подсистем) «структура-функция».....                                                | 110        |
| 6.2.3. Системный уровень «организация-поведение».....                                                        | 111        |
| 6.2.4. Уровень «метасистема-деятельность».....                                                               | 112        |
| 6.3. Принципы системных исследований эффективности.....                                                      | 113        |
| 6.3.1. Сущность теоремы Геделя.....                                                                          | 113        |
| 6.3.2. Принцип внешнего дополнения.....                                                                      | 113        |
| 6.3.3. Принцип декомпозиции систем.....                                                                      | 115        |
| 6.4. Уровни исследования систем.....                                                                         | 115        |
| 6.4.1. Концептуальный уровень исследования.....                                                              | 115        |
| 6.4.2. Операционный уровень исследования.....                                                                | 119        |
| 6.4.3. Уровень детального исследования.....                                                                  | 120        |
| 6.5. Общая схема исследований эффективности операций.....                                                    | 120        |
| 6.5.1. Проблемный анализ.....                                                                                | 121        |
| 6.5.2. Концептуальные исследования.....                                                                      | 122        |
| 6.5.3. Операциональные исследования.....                                                                     | 123        |
| 6.5.4. Детальные исследования.....                                                                           | 124        |
| 6.5.5. Принятие решения.....                                                                                 | 124        |
| 6.6. Пример постановки задачи синтеза системы.....                                                           | 126        |
| 6.7. Формальные схемы исследования эффективности операции.....                                               | 128        |
| <b>7. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМНОЙ СИТУАЦИИ И ЗАДАЧ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ.....</b>                                   | <b>131</b> |
| 7.1. Проблемная ситуация.....                                                                                | 131        |
| 7.2. Модель проблемной ситуации.....                                                                         | 131        |
| 7.3. Задачи принятия решений.....                                                                            | 135        |
| 7.3.1. Задача структуризации исходной информации.....                                                        | 136        |
| 7.3.2. Задача анализа неопределенности.....                                                                  | 136        |
| 7.3.3. Задача формирования исходного множества стратегий.....                                                | 138        |
| 7.3.4. Задача моделирования исходов операции.....                                                            | 140        |
| 7.3.5. Задача моделирования цели операции.....                                                               | 141        |
| 7.3.6. Задача моделирования предпочтений.....                                                                | 142        |
| 7.4. Классификация задач принятия решений.....                                                               | 143        |

|                                                                                                                             |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>8. ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ<br/>ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЭТАПАХ<br/>ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА .....</b> | <b>147</b> |
| 8.1. Жизненный цикл организационно-технической системы.....                                                                 | 147        |
| 8.1.1. Управление процессом становления и развития ОТС.....                                                                 | 148        |
| 8.1.2. Внешнее проектирование.....                                                                                          | 150        |
| 8.1.3. Внутреннее проектирование.....                                                                                       | 152        |
| 8.2. Описание обобщённой операции .....                                                                                     | 152        |
| 8.2.1. Упрощенное описание задачи .....                                                                                     | 154        |
| 8.2.2. Согласование целей и задач.....                                                                                      | 154        |
| 8.2.3. Граф целей и задач .....                                                                                             | 156        |
| 8.2.4. Дерево целей .....                                                                                                   | 157        |
| 8.2.5. Количественная оценка достижения цели .....                                                                          | 158        |
| 8.2.6. Структурная схема $S_0$ -системы .....                                                                               | 159        |
| 8.2.7. Схема обобщённой операции .....                                                                                      | 162        |
| 8.3. Оценивание эффективности технической системы в период<br>её создания .....                                             | 164        |
| <b>9. ОЦЕНИВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАЦИЙ .....</b>                                                                           | <b>167</b> |
| 9.1. Содержание задачи оценивания эффективности .....                                                                       | 167        |
| 9.1.1. Этапы оценивания эффективности .....                                                                                 | 167        |
| 9.1.2. Задача оценивания эффективности операции .....                                                                       | 168        |
| 9.1.3. Структурная схема модели операции и её описание .....                                                                | 169        |
| 9.1.4. Построение математической модели операции .....                                                                      | 171        |
| 9.1.5. Планирование экспериментов на компьютере .....                                                                       | 173        |
| 9.2. Основные методы моделирования .....                                                                                    | 174        |
| 9.2.1. Классификация методов моделирования.....                                                                             | 174        |
| 9.2.2. Имитационное моделирование.....                                                                                      | 176        |
| 9.3. Принципы моделирования операций в технике.....                                                                         | 177        |
| 9.3.1. Принцип информационной достаточности .....                                                                           | 177        |
| 9.3.2. Принцип параметризации .....                                                                                         | 177        |
| 9.3.3. Принцип агрегирования .....                                                                                          | 178        |
| 9.3.4. Принцип осуществимости.....                                                                                          | 178        |
| 9.3.5. Принцип рационального использования факторного<br>пространства .....                                                 | 179        |
| 9.3.6. Принцип множественности моделей .....                                                                                | 181        |
| 9.4. Классификация моделей оценивания эффективности.....                                                                    | 181        |
| 9.4.1. Статические и динамические модели .....                                                                              | 181        |
| 9.4.2. Дискретные и непрерывные модели .....                                                                                | 181        |
| 9.4.3. Детерминированные и вероятностные модели .....                                                                       | 182        |
| 9.4.4. Статистические модели.....                                                                                           | 182        |
| 9.4.5. Использование имитационных моделей .....                                                                             | 183        |
| <b>10. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И СХЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО<br/>МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ .....</b>                                      | <b>185</b> |
| 10.1. Математическое описание операции .....                                                                                | 185        |
| 10.1.1. Состояние системы.....                                                                                              | 185        |
| 10.1.2. Функционирование системы.....                                                                                       | 185        |
| 10.1.3. Входные параметры системы .....                                                                                     | 186        |
| 10.1.4. Функция перехода и оператор перехода.....                                                                           | 186        |
| 10.1.5. Выбор стратегий .....                                                                                               | 187        |
| 10.1.6. Выход системы .....                                                                                                 | 188        |

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| 10.1.7. Оператор выхода .....                          | 189 |
| 10.2. Общая схема операции .....                       | 189 |
| 10.3. Частные описания операций .....                  | 192 |
| 10.3.1. Задачи математического программирования.....   | 192 |
| 10.3.2. Задачи стохастического программирования.....   | 194 |
| 10.3.3. Задачи оптимального управления.....            | 195 |
| 10.3.4. Задачи вариационного исчисления.....           | 196 |
| 10.3.5. Марковские управляемые случайные процессы..... | 197 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....                                        | 199 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....                 | 200 |

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

|      |                                               |
|------|-----------------------------------------------|
| ДЗЗ  | - дистанционное зондирование Земли            |
| КА   | - космический аппарат                         |
| ККС  | - конструктивно-компоновочная схема           |
| КСН  | - космическая система наблюдения              |
| ЛПР  | -лицо, принимающее решение                    |
| МИК  | - монтажно-испытательный корпус               |
| МТЧ  | - метеорно-техногенные частицы                |
| НИИ  | - научно-исследовательский институт           |
| НИР  | - научно-исследовательские работы             |
| НППИ | - наземный пункт приёма и передачи информации |
| ОКР  | - опытно-конструкторская работа               |
| ОТС  | - организационно-техническая система          |
| ОТТ  | - общие технические требования                |
| ОЭТК | - оптико-электронный телескопический комплекс |
| ПГС  | - пневмогидравлическая система                |
| РН   | - ракета-носитель                             |
| РД   | - ракетный двигатель                          |
| РКК  | - ракетно-космический комплекс                |
| РКН  | - ракета космического назначения              |
| СК   | - стартовый комплекс                          |
| СОТР | - система обеспечения теплового режима        |
| СОУД | - система обеспечения управления движением    |
| ССО  | - солнечно-синхронная орбита                  |
| СТС  | -сложная техническая система                  |
| СЭП  | - система электропитания                      |
| ТС   | - техническая система                         |
| ТТЗ  | - тактико-техническое задание                 |
| ТТТ  | - тактико-технические требования              |
| ТТХ  | - тактико-технические характеристики          |
| ЭП   | - эскизный проект                             |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие предназначено для подготовки студентов высших учебных заведений РФ, обучающихся по специальности 230301 «Моделирование и исследование операций в организационно-технических системах», изучающих дисциплину «Методы исследования операций организационно-технических систем», и по специальности 160400.65 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов» специализации:

- «Пилотируемые и автоматические космические аппараты и системы», изучающих дисциплину «Методы исследования эффективности пилотируемых и автоматических космических аппаратов»;
- «Моделирование и информационные технологии проектирования ракетно-космических систем», изучающих дисциплину «Методы исследования эффективности космических мониторинговых и транспортных систем».

Учебное пособие также может быть полезно молодым специалистам ракетно-космической отрасли.

Приводятся сведения по концептуальным и методологическим основам исследования эффективности технических систем.

За основу учебного пособия взяты некоторые положения, изложенные в десятитомном справочнике «Надежность и эффективность в технике», а именно в томе 3 «Эффективность технических систем» под редакцией академика АН СССР В. Ф. Уткина и д-ра техн. наук Ю. В. Крючкова (Москва: Машиностроение, 1988. – 328 с.), а также положения, изложенные в учебных пособиях [12, 14] и др.

Автор выражает благодарность заместителю заведующего кафедрой космического машиностроения СГАУ, заслуженному деятелю науки РФ, д-ру техн. наук профессору В. В. Салмину, главному научному сотруднику ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», заслуженному деятелю науки и техники РФ, лауреату Ленинской премии, д-ру техн. наук профессору А. В. Соллогубу и доценту кафедры информационно-технических систем СГАУ, канд. техн. наук Б. А. Есипову за ценные замечания, которые были учтены при подготовке рукописи учебного пособия к изданию.

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе создания современных технических систем используются методы исследования эффективности. Чтобы грамотно применять данные методы, необходимо иметь представление о методологических основах исследования эффективности, которые по своей сути являются элементами системного подхода при проектировании технических систем.

Цель учебного пособия – помочь студентам освоить концептуальные и методологические основы системного проектирования и исследования эффективности целенаправленных процессов (операций) технических систем.

В учебном пособии рассматриваются основные понятия, связанные с исследованием операций, принципы исследования целенаправленных процессов, задачи исследования эффективности технических систем. Обсуждаются методы оценивания и методы исследования эффективности функционирования технических систем, методические вопросы построения математических моделей операционного комплекса.

Учебное пособие состоит из десяти разделов.

В разделах 1, 2 и 3 приводятся основные положения теории эффективности, рассматриваются факторы, определяющие эффективность в технике, обсуждается проблема преобразований в различных шкалах и допустимые преобразования показателей.

В разделах 4 и 5 приводятся различные формы показателей эффективности, обсуждаются критерии эффективности в рамках концепций пригодности, оптимизации и адаптивизации. Обсуждаются показатели и критерии эффективности космической системы наблюдения.

В разделе 6 обсуждаются основные принципы и методологические уровни исследования эффективности технических систем, принципы системных исследований эффективности, приводится общая методологическая схема исследования эффективности операции.

В разделе 7 рассматриваются вопросы общего описания проблемы принятия решения при исследовании эффективности технических систем, модели проблемной ситуации, задачи принятия решений.

В разделе 8 обсуждаются особенности исследования эффективности технических систем на этапах жизненного цикла с учётом управления процессом становления и развития создаваемой организационно-технической системы. Рассматриваются вопросы описания обобщенной операции, согласования целей и задач на основе дерева целей. Обсуждается схема обобщенной операции.

В разделе 9 рассматриваются этапы и задачи оценивания эффективности, методические вопросы построения математической модели операции, классификации этапов моделирования. Обсуждаются принципы моделирования операции в технике и, в частности, имитационное моделирование сложных ракетно-космических систем.

В разделе 10 обсуждаются методические вопросы математического моделирования операции, вопросы состояния и функционирования системы. Рассматриваются функции перехода, операторы перехода и операторы выхода, приводится общая схема операции. Рассматриваются частные описания операций.

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

В процессе человеческой деятельности могут возникать определенные проблемы. Для решения каких-либо проблем создаются технические или организационно-технические системы. Такие системы служат активным средством в целенаправленной деятельности человека (организации, страны, человечества).

Система представляет собой совокупность элементов (предметов любой природы), находящихся в отношениях и связях друг с другом. При объединении элементов в систему последняя приобретает специфические системные свойства, не присущие ни одному из элементов. Эти свойства называют *интегративными* или *эмерджентными*. Свойства системы шире суммы свойств составляющих ее элементов.

Например, каждая из бортовых систем и каждый из элементов конструкции КА ДЗЗ выполняют определённые функции: обеспечения прочности и жёсткости конструкции, снабжения электропитанием, терморегулирования, ориентации КА в пространстве, управления движением, проведения съёмки, преобразования видеоинформации, передачи её на наземные пункты и др. И только интеграция этих функций на борту, а также совместно с другими элементами космической системы наблюдения, включая наземный сегмент, позволяет получать качественные снимки с заданными показателями периодичности и детальности наблюдения, производительности съёмки и оперативности передачи информации на Землю и др.

## 1.1. Сложность систем

Простые проблемы решаются в рамках простых систем; для решения сложных, крупных проблем требуется создание сложных технических и организационно-технических систем.

Деление систем на простые и сложные - условно. Чётких граней между уровнями сложности систем нет. И, тем не менее, одним из признаков СТС является то, что она имеет разделенные в пространстве элементы (технические системы, изделия) различной физико-

12

технической природы, связь между которыми и управление осуществляются с помощью информационных потоков. Объединенные информационными связями в целостную совокупность компоненты сложной технической системы функционируют согласованно, обеспечивая решение задач, для которых предусмотрена система.

Другим признаком СТС является *предсказуемость поведения*, свойств и реакций на внешние воздействия. Системы со слабо предсказуемым поведением относят к сложным системам. Сложным системам присуща способность принимать решения. Это определяющее отличие сложных систем от простых. Простые системы не обладают такой возможностью. В настоящее время считается, что одним из признаков СТС является наличие у них искусственного интеллекта.

Если сложная техническая система функционирует благодаря организационной деятельности коллектива людей, то такую систему называют организационно-технической.

На практике чёткую границу между сложными техническими и организационно-техническими системами провести не всегда легко. Например, космический аппарат наблюдения можно считать сложной технической системой, если он (какое-то время) функционирует автономно. Но КА является элементом космической системы наблюдения и его поведение периодически контролируется и корректируется с помощью наземных средств, управляемых коллективами специалистов.

Примерами организационно-технических систем, кроме упомянутых космических систем, могут служить: производственное предприятие, конструкторское бюро, университет и т.п.

## 1.2. Основы системного подхода

Основой проектирования, строительства и эксплуатации сложных технических, а также организационно-технических систем является системный подход.

В основе системного подхода лежит стремление изучить объект (предмет, систему, проблему, явление, процесс) как нечто целостное и организованное, во всей его полноте и во всем многообразии связей в объекте. Согласно системному подходу каждый компонент СТС должен разрабатываться так, чтобы для СТС в целом обеспечить достижение поставленной перед нею цели, и при этом с требуемой эффективностью.

Чтобы лучше понять сущность этого принципа, укажем его альтернативу: несистемный подход – это стремление разрабатывать элементы СТС как самостоятельные и не связанные между собой.

Суть системного подхода синтеза ОТС или СТС заключается в следующем.

1. На начальной стадии исследований следует всесторонне изучить проблему, выявив:

- её масштабы;
- актуальность;
- источник возникновения;
- связи с другими проблемами;
- наличные (или потребные) ресурсы для её решения;
- возможность решения в приемлемые сроки.

2. Необходимо выделить и достаточно четко сформулировать цель ( $A_0$ ) (или цели), осуществление которых существенно снижает или устраняет различие между желаемым и действительным результатом. То есть формируются системы согласованных или альтернативных целей деятельности, направленной на решение проблемы. Выбираются из них наиболее эффективные.

Глобальная цель, как правило, допускает декомпозицию, в результате которой производится анализ частных задач и формируются взаимосвязанные частные цели, которые, в общем случае, могут быть подвергнуты дальнейшему членению на более простые составляющие (подцели, задачи). На основе структурных схем декомпозиции составляется дерево целей, с помощью которого в дальнейшем производится синтез системы. Другими словами, производится композиция взаимосвязанных частных целей в глобальную цель.

Кроме конечных целей, существуют цели промежуточные. Принцип системного подхода в этом случае состоит в том, чтобы промежуточные цели были подчинены конечным целям. Поэтому системный подход иногда называют *целевым* подходом.

Причина многих ошибочных решений – ориентация на промежуточные цели, т. е. когда принимают решения, часто забывают о конечной цели.

3. Вычленяется подсистема  $S_A$ , на которую собственно и направлено (в будущем) наше действие (или противодействие) для решения существующей проблемы.

4. Формируется начальный облик системы  $S_n$ , создание и функционирование которой (в будущем) обеспечит достижение заданной цели  $A_0$ .

5. Разработчик рассматривает системы  $S_B$  и  $S_A$  как подсистемы некоей системы  $S_0$  более высокого ранга, в которой собственно и проводится операция (см. рис. 1.1).

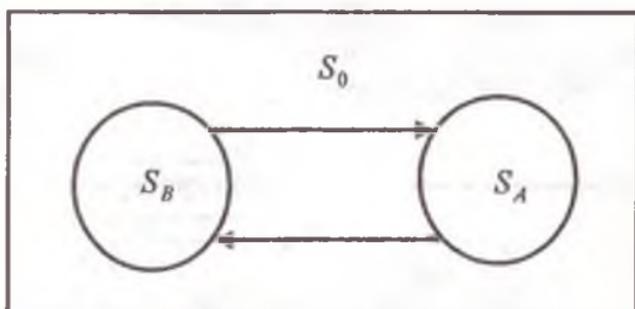


Рис. 1.1. Система, в которой проводится операция, и её подсистемы

6. Формируются исходные данные (ИД) и ограничения различного рода (политические, финансовые, технические, временные и др.), которые накладываются на систему сверху либо исходя из возможностей её реализации. ИД и ограничения формируются на основе анализа системы  $S_0$  с учётом подсистем  $S_B$ ,  $S_A$ . На начальных этапах исходные данные и ограничения не всегда известны и для их формирования необходимо проводить отдельные научно-исследовательские работы (НИР).

7. Формулируются исходные требования (Т) к создаваемой подсистеме  $S_B$  в составе системы  $S_0$  на основе ИД, ограничений и на основе цели создаваемой системы с учётом её функционирования.

8. На базе этих требований формируются ориентировочно некоторые подсистемы (ПС), элементы (Э). Выбор осуществляется с учётом возможных альтернатив. При этом необходимо согласовывать цели подсистем с общей целью системы и выявлять все последствия и взаимосвязи каждого решения.

9. Выбираются критерии для формирования лучших вариантов.

10. Осуществляется оптимизация проекта в соответствии с принятыми критериями выбора с учётом обратной связи (влияния проектных характеристик создаваемой системы на достижение цели проекта), а также с учётом потребных материальных ресурсов и времени.

Кроме того, при моделировании необходимо обеспечить максимальную эффективность системы. Эффективность обычно определяется как некоторая разность между какими-то показателями ценности результатов, полученных в итоге моделирования, и теми затратами, которые были вложены в её разработку и создание.

Упрощенная схема процесса синтеза модели ОТС на основе системного подхода представлена на рис. 1.2.

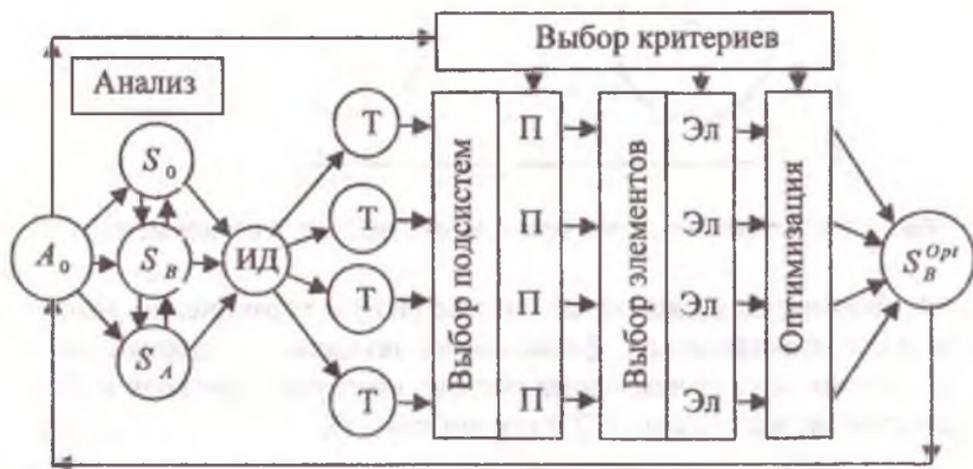


Рис. 1.2. Упрощенная схема процесса синтеза модели ОТС на основе системного подхода

### 1.3. Аспекты исследования технических систем

*Аспект* [лат. aspectus - вид] – точка зрения, одна из сторон или связей данного явления.

Схема, иллюстрирующая различные аспекты исследования космической системы наблюдения, представлена на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Аспекты исследования космической системы наблюдения

Рассмотрим в тезисной форме эти аспекты.

### *Исторический аспект*

В этом плане рассматриваются вопросы истории создания ракетно-космической техники. Выделяются вопросы, связанные с созданием первых баллистических ракет, которые стали прообразом создания ракет космического назначения. Рассматриваются вопросы истории создания и развития космических систем.

В этой связи интересным является мнение, что если бы не было «холодной» войны, то освоение космоса было бы гораздо позднее.

### *Технический аспект*

Собственно, этот аспект в основном и рассматривается в данной дисциплине. Поэтому здесь на нем останавливаться не будем.

### *Организационный аспект*

При рассмотрении данного аспекта следует учитывать сложившуюся практику. Так, в России главной гражданской организацией, которой поручено заниматься вопросами ракетно-космических систем и техники, является «Роскосмос» (ранее «Аэрокосмос»). Главным научно-исследовательским институтом отрасли является ЦНИИМАШ – Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (название осталось с советских времён, когда засекречивались организации, занимающиеся ракетно-космической техникой). Военный космос курирует Министерство обороны и соответствующие военные НИИ.

Ниже по иерархической лестнице располагаются конструкторские бюро различного назначения, например ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» (г. Самара), занимающийся проектированием и эксплуатацией ракетно-космической техники, в том числе космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

У каждого из конструкторских бюро есть своя кооперация. Так, ООО «Кузнецов» (ранее завод имени М. В. Фрунзе, г. Самара) поставляет ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» двигатели для ракет-носителей типа «Союз». В кооперации также участвуют металлургические заводы, приборостроительные заводы. Всего в кооперацию входит несколько сотен предприятий отрасли.

### *Экономический аспект*

При рассмотрении данного аспекта следует учитывать, что большая часть ракетно-космических и космических систем (не считая научного и военного назначения) в настоящее время должны об-

ладать экономической эффективностью. Экономическая эффективность определяется как разница между доходом от эксплуатации системы и расходом на разработку, производство и эксплуатацию.

### ***Финансовый аспект***

При рассмотрении данного аспекта следует получить ответы на следующие вопросы. Кто платит? Сколько? За что? Кому? Когда? Через какие банки?

Ранее ракетно-космические системы могли создавать лишь высокоразвитые в научном и техническом плане государства.

В нашей стране финансирование ведётся через Роскосмос, Министерство обороны и через Академию наук РФ. В последние годы в развитие ракетно-космической техники и систем приходят частные инвестиции. Например, ракета-носитель «Фалкон-9» (США) создаётся по программе, финансируемой частным лицом. Причём, как утверждают создатели, эта ракета будет обладать самой низкой стоимостью создания и эксплуатации (в своём классе).

### ***Политический аспект***

Напомним, что в своё время президент США Рейган предложил программу «Звёздных войн», основным элементом которой была противоракетная оборона (ПРО). СССР вынужден был отвечать и разрабатывать свою программу ПРО.

В конце 80-х годов 20-го века по некоторым вопросам ПРО СССР опережала США. США потребовали заключить международный договор по ограничению технологий ПРО и он был заключён.

В 90-х годах 20-го века исследования по вопросам ПРО в России практически не проводили. США продолжали наращивать финансирование программы ПРО. Президент США Билл Клинтон сказал: «Кто владеет космосом, тот владеет миром!». При президенте США – Д. Буше США продолжали наращивать финансирование программы ПРО, а затем вышли из договора по ПРО в одностороннем порядке. Д. Буш сказал, что ограничения по ПРО противоречат национальным интересам США.

В настоящее время Китай наметил программу – догнать и перегнать Америку по космическим исследованиям, в том числе и по программе полёта человека на Луну. Это политическая задача.

Политический аспект связан с экономическим. При выделении финансирования на амбициозные космические программы страна через несколько лет может получить большой экономический эффект через высокие технологии, полученные в результате разработки космических программ.

### ***Военный аспект***

Спутниковая разведка повышает эффективность применения наземных средств вооружения примерно в полтора раза. Корректировка военных операций с помощью разведывательных спутников также повышает их эффективность.

В настоящее время государства стремятся создавать так называемые «двойные технологии», при которых в мирное время получают экономический эффект от космических систем, которые могут использоваться и в военных целях. Вспомним КА наблюдения «Ресурс ДК», системы связи и навигации.

### ***Социальный аспект***

В настоящее время невозможно представить функционирование высокоразвитого общества без космической связи, телевидения, метеорологических КА для предсказания погоды, навигации и др.

Новые технологии поступают в народное хозяйство (лекарство, кристаллы с уникальными свойствами и др.).

### ***Философский аспект***

С началом эксплуатации космических телескопов появилось много открытий, связанных с происхождением вселенной. Человечество получило самый мощный толчок в осмыслении своего места в бесконечной Вселенной.

### ***Религиозный аспект***

В некоторых народных преданиях были, например, такие положения, что Земля стоит на трёх китах. Отметим, что в Библии имеются упоминания о том, что Земля – шар.

Н. Коперник (XVI век) и Галилео Галилей (XVI - XVII века) преследовались церковью за то, что установили, что Земля движется вокруг Солнца, а не наоборот.

Современные общемировые религии признают практически большинство положений, добытых с помощью космических средств.

## **1.4. Задачи оценивания эффективности технических систем**

Этот вопрос рассмотрим на примере исследования эффективности космической системы наблюдения.

Эффективность КСН можно рассматривать применительно к различным этапам жизненного цикла (ЖЦ):

- эффективность целевого использования КСН;
- эффективность процесса развертывания КСН;
- эффективность процесса производства КСН;
- эффективность процесса проектирования КСН;
- эффективность процесса модернизации проектной организации (реинжиниринг).

На рис. 1.4 в укрупнённой форме представлены задачи исследования эффективности на различных этапах ЖЦ создаваемых систем.

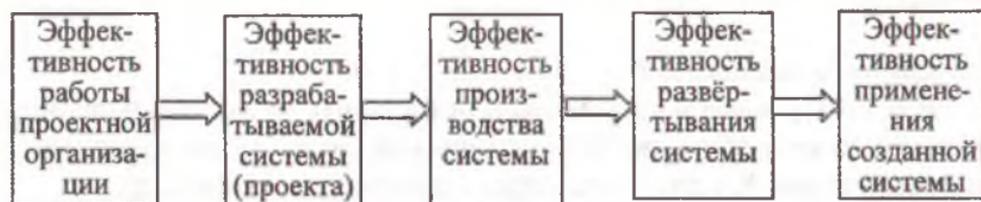


Рис. 1.4. Задачи исследования эффективности на различных этапах жизненного цикла создаваемых систем

Каждый из приведённых этапов можно анализировать более подробно. Например, на этапе исследования эффективности процесса модернизации проектной организации можно рассматривать различные альтернативные пути прохождения проектов по отделениям с учётом того, что за каждым проектом может быть закреплён свой главный конструктор (Генеральный конструктор руководит всеми проектами).

На рис. 1.5 приведена упрощенная схема одной из схем организации работ в опытно-конструкторском бюро с проектами.



Рис. 1.5. Упрощенная схема организации работ в КБ с проектами

Горизонтальными стрелочками обозначены работы, проводимые по каждому из проектов (на рисунке показаны 7 проектов). Эти работы проводятся последовательно в различных отделениях (на рисунке показаны отделения с номерами от 1 до 8). Вертикальными стрелочками обозначены работы по каждому из проектов, проводимые в каждом отделении опытно-конструкторского бюро.

## 1.5. Иерархические уровни исследования эффективности

В зависимости от поставленной задачи один и тот же объект исследования может рассматриваться как элемент или как система.

То есть всегда можно представить себе более обширную систему (надсистему), в которую входит данная, и всегда можно выделить из данной системы какую-либо её часть, являющуюся более ограниченной системой, которую иногда называют подсистемой.

Например, в качестве надсистемы космической системы наблюдения можно рассматривать систему противоракетной обороны, если КСН используется в составе противоракетной обороны.

Иногда вместо терминов надсистема, подсистема для конкретных ТС используют специфические термины, например, космический комплекс, бортовые системы и т.п. В некоторой литературе вместо терминов подсистема, элемент для характеристики систем иерархической структуры используется термин компонент. Ниже приведен пример декомпозиции КСН по уровням исследования.

Уровень 0 - эффективность КСН.

*Подсистемы:*

Уровень 1 – эффективность элементов КСН (КА, РН, НППИ, Центр управления...).

Уровень 2 – эффективность бортовых систем и конструкции КА (целевая аппаратура, СЭП, СОТР, СОУД...).

Уровень 3 – эффективность подсистем СОУД (система ориентации, стабилизации, ...), эффективность целевой аппаратуры (ОЭТК, фотоприемные устройства, система хранения и преобразования, ВРЛ, ...).

Уровень 4 – эффективность ОЭТК (линзовые, зеркальные).

Уровень 5 – элементная база.

Например, на уровне 4 можно подробнее анализировать эффективность применения линзовых или зеркальных телескопических комплексов. В табл. 1.1 представлены достоинства и недостатки лин-

зовых и зеркальных телескопов, которые могут быть формализованы и представлены в виде частных показателей эффективности.

Таблица 1.1. Достоинства и недостатки линзовых и зеркальных телескопов

| Линзовые            | Зеркальные              |
|---------------------|-------------------------|
| <i>Достоинства</i>  |                         |
| - конструкция проще | - большая детальность   |
| - шире угол зрения  | - меньшая длина         |
| - малый диаметр     |                         |
| <i>Недостатки</i>   |                         |
| - большая длина     | - малый угол зрения     |
|                     | - большой диаметр       |
|                     | - сложность конструкции |

Заметим, что уровни исследования конкретных систем могут быть произвольными. Однако в методологическом плане они делятся на четыре методологических уровня. Но этот вопрос будет рассмотрен позже.

## 1.6. Исследование операций

### *Операция*

*Операция* (от лат. operatio – действие) – действие или ряд действий, направленные на достижение какой-либо цели (например, военная операция, хирургическая операция).

Для достижения поставленной цели необходима *целенаправленная деятельность* – операция. *Операция* есть система целенаправленных действий, объединенных общим замыслом и единой целью.

Термин «Исследование операций» в современном его понимании появился в период 2-й мировой войны в связи с организацией при некоторых военных штабах специальных исследовательских групп, занятых изучением военных операций, например операций по уничтожению подводных лодок противника, охране караванов судов, противовоздушной обороне, использованию новых видов оружия и др. Эти группы на основе изучения опыта военных действий и на основе научного анализа давали рекомендации руководству относительно распределения сил и средств, выбора наиболее эффективных способов проведения военных операций.

В дальнейшем методы исследования операций были применены в ряде областей невоенного характера. Более того, оказалось, что понятие «Исследование операций» охватывает ряд ранее существовавших разделов науки и техники, которые, как это теперь стало ясным, имели своим предметом некоторые частные проблемы исследования операций. В настоящее время трудно назвать область человеческой деятельности, в которой не было бы места для применения исследования операций.

В общем виде спланированная операция должна содержать ответы на вопросы:

- на что воздействовать;
- чем действовать;
- как действовать для успешного достижения поставленной цели.

Операция формируется в рамках  $S_0$  системы, которая в качестве основных компонентов содержит:

- орган управления операцией;
- активные средства;
- объект операции (объект воздействия)  $S_A$ .

Не следует путать создаваемую систему, предназначенную для решения конкретной проблемы (систему  $S_B$ ), и систему, в которой производится или исследуется операция (систему  $S_0$ ). Система  $S_0$  включает в себя систему  $S_B$  и объект воздействия (систему  $S_A$ ), как это схематично изображено на рис. 1.6.

По отношению к  $S_0$ -системе цель  $A_0$  операции выступает основным системообразующим фактором как способ интеграции различных действий в единую последовательность.

*Эффективность операции* в технике оценивается с целью решения следующих задач:

- принятия решения относительно допустимости практического использования оцениваемого способа действий в той или иной ситуации;

- выявления вкладов (эффектов) различных факторов в общую эффективность операции, влияния взаимодействий факторов на эффективность;

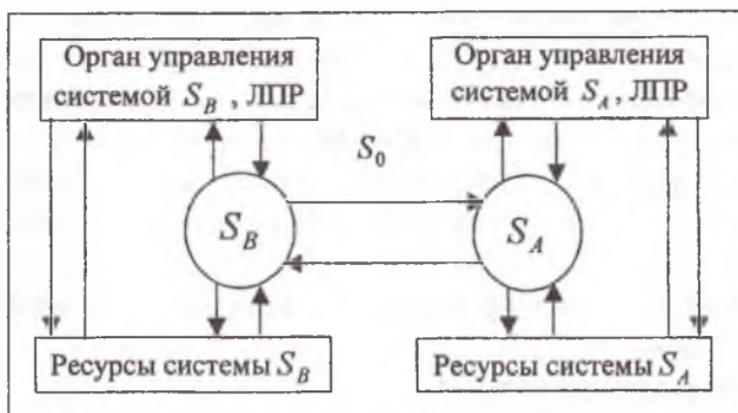


Рис. 1.6. Упрощенная схема системы для исследования операции:

$S_B$  - исследуемая ТС;  $S_A$  - ТС, на которую осуществляется воздействие;  $S_0$  - система, в которой проводится операция

- установления путей повышения эффективности операции (выявления резервов эффективности);
- выявления функциональных возможностей технических средств, используемых в операции;
- сопоставления (сравнения) нескольких альтернативных вариантов действий или технических средств, их ранжирования по уровням эффективности (установление отношения предпочтения на множестве возможных вариантов) и др.

Последняя задача часто выступает как подпроблема оценки эффективности. Её называют *задачей сравнительной оценки* вариантов (способов действий, систем).

В общей проблеме выбора *рационального способа использования активных средств* в операции или путей развития технических средств выделяют задачи:

- выбора целесообразного способа управления техническими средствами с заданными функциональными характеристиками;
- определения рационального режима эксплуатации ТС;
- выработки оптимального плана операции;
- оптимального распределения ресурсов между подсистемами в операции;
- выбора рационального варианта проектируемой ТС;
- формирования программы развития сложных ТС;
- выработки технико-экономических требований к создаваемым средствам (системам);

- выдвижения гипотез рационального поведения подсистем, находящихся во взаимодействии с исследуемой системой и др.

### Качество систем

*Качество* системы – совокупность её свойств и характеристик, которые придают системе способность удовлетворять обусловленные или предполагаемые потребности.

На рис. 1.7 приведена схема, иллюстрирующая усложняющиеся (вложенные) качества систем [7]. Рассмотрим эти качества применительно к космическим аппаратам наблюдения.

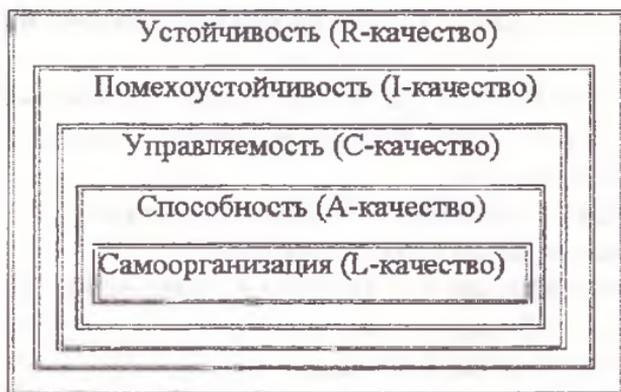


Рис. 1.7. Усложняющиеся качества систем

*Устойчивость* характеризует свойства системы противостоять внешним факторам (прочность, надежность, живучесть) и возвращать систему в работоспособное состояние после воздействия этих факторов.

*Помехоустойчивость* характеризует свойства системы без искажений воспринимать и передавать информационные потоки по каналам сообщения.

*Управляемость* характеризует свойства системы переходить за конечное (заданное) время из одного состояния в другое (требуемое) под влиянием управляющих воздействий.

*Способность* характеризует свойства системы получать результат, для получения которого и предназначена создаваемая система. Этот результат также называют выходным или целевым эффектом, который получается в результате проведения определенных операций, направленных на достижение этого эффекта.

*Самоорганизация* характеризует свойства системы определять состояние системы после отказа в штатных условиях эксплуатации или в результате преднамеренных воздействий противника, выполнять действия, направленные на восстановление способности получать целевой эффект (частично или полностью) и проводить дальнейшую работу. Причем все эти действия могут проводиться без вмешательства человека. Сложным системам присуща способность принимать решения (L-качество).

В данной работе ограничимся рассмотрением только А-качества (способности).

*Показатели* качества – количественные характеристики свойств системы, обеспечивающих её пригодность к выполнению своего назначения.

Целевые характеристики космической системы наблюдения являются, по сути дела, характеристиками (или показателями) качества этой системы:

- обзорность космической системы наблюдения;
- спектральные диапазоны наблюдения;
- показатели детальности (линейное разрешение на местности, разрешающая способность на местности);
- размеры ширины захвата кадра;
- масштаб снимка;
- точность привязки снимка к геодезическим координатам;
- характеристики старения информации;
- показатели периодичности наблюдения объектов;
- показатели оперативности получения видеoinформации;
- показатели производительности КА наблюдения;
- точность ориентации оптической оси аппаратуры наблюдения на снимаемый объект;
- срок активного существования и др.

## **1.7 Условия применения систем и способы использования активных средств в операции**

### ***1.7.1. Факторы, формирующие условия функционирования систем***

В процессе эксплуатации системы показатели её качества могут быть реализованы не в полной мере. Результаты целевого функционирования сложной технической системы зависят не только

от показателей качества этой системы, но ещё от внешних (по отношению к системе) *условий применения* сложной технической системы и от *способов использования активных средств управления* этой системой.

Под факторами будем понимать условия, причины, параметры, показатели, оказывающие влияние, воздействие на операционную ситуацию и результаты операции.

К факторам, формирующим условия функционирования систем, относятся:

- природные факторы (природно-климатические условия, географическое местоположение и т. д.);
- факторы, являющиеся следствием активных действий конкурентов или партнеров (например, возможность, характер, способы целенаправленного противодействия);
- факторы, характеризующие наличие и виды различного рода ограничений (экономических, социальных, экологических и др.).

Применительно к космической системе наблюдения природно-климатическими условиями являются:

- высота Солнца над горизонтом (для аппаратуры зондирования в видимом спектре);
- яркость объекта наблюдения и контрастность изображения;
- облачность (для аппаратуры зондирования в видимом спектре).

К внешним условиям функционирования КСН также относятся:

- помехи, возникающие при передаче изображения или командных сигналов по радиолинии;
- противодействие конкурентов или противника и др.

### ***1.7.2. Факторы, определяющие способы использования активных средств управления в операции***

К факторам, определяющим способы использования активных средств управления, относятся факторы, определяющие:

- распределение частных задач и выделенных ресурсов между элементами системы;
- пространственно-временную последовательность выполнения отдельных видов работ (действий);
- способы управления и планирования;
- способы связи и взаимодействия между элементами системы;
- режимы и регулярность использования и т. д.

Эти факторы определяют (задают) порядок и приемы использования ТС для решения поставленных задач в операции.

Каждой СТС или ОТС присущи свои, специфические способы применения активных средств.

Так, например, если необходимо выбрать лучший проект системы для определенных условий и способов её применения, то тогда в качестве стратегии  $u \in U$  выступают совокупности характеристик того или иного проекта.

Если ставится задача выбора (создания) такого комплекса условий проведения операции (функционирования ТС)  $u^*$ , при котором эффективность операции (ТС) наибольшая, то множество стратегий  $U$  формируется из множества факторов, характеризующих условия проведения операции (функционирования ТС).

На рис. 1.8 представлена схема, иллюстрирующая влияние условий применения и способов использования активных средств в операции на эффективность космической системы наблюдения.



Рис. 1.8. Влияние условий применения и способов использования активных средств на эффективность КСН

Способы использования активных средств управления обычно относят к операции и называют стратегией ( $U$ ).

К активным средствам операции относятся технические средства (орудия, машины, аппаратура управления, технические комплексы, большие технические системы), а также ресурсы (натуральные, энергетические, информационные, временные, денежные и т. п.).

За полученный результат система расплачивается ресурсами  $C$ . Очевидно, чем ближе результат обмена к предельно выгодному, тем эффективнее операция.

Предельно выгодный обмен характеризует потенциальную эффективность операции, которая соответствует качеству.

Результат  $Y$  операции ставят в зависимость от основных результирующих факторов:

- полезного эффекта  $q$ ;
- затраченных ресурсов  $C$ ;
- времени  $T$ .

### *1.7.3. Факторы, формирующие результат операции*

В отдельную группу (по степени общности) выделяют результирующие факторы, т. е. факторы, непосредственно формирующие результат операции.

К результирующим факторам, как уже отмечалось, относят полезный эффект  $q$ , достигнутый в операции, затраченные ресурсы ( $C$ ) и сроки ( $T$ ) проведения операции. Результат операции представляют в виде вектора, компонентами которого являются результирующие факторы, т. е.

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

или описывают функцией от результирующих факторов. Достаточно общим, например, является представление результата операции в виде степенной функции от результирующих факторов:

$$Y = \alpha_0 q^{\alpha_1} C^{\alpha_2} T^{\alpha_3},$$

где  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  — параметры функции результата.

При этом результат будет нулевым, если хотя бы один из результирующих факторов положить равным нулю. Для описания

результата в практике часто используют различные частные случаи приведенной функции.

Так, если положить  $\alpha_0 = \alpha_1 = 1$  и  $\alpha_2 = \alpha_3 = 0$ , то  $y = q$ .

Если  $\alpha_0 = \alpha_2 = 1$  и  $\alpha_1 = \alpha_3 = 0$ , то  $y = C$ .

При  $\alpha_0 = \alpha_3 = 1$  и  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$   $y = T$ .

В этих частных случаях результат операции описывается лишь результирующим фактором (при этом на остальные результирующие факторы накладываются обычно ограничения в виде неравенств).

Если положить  $\alpha_0 = \alpha_1 = 1$  и  $\alpha_2 = -1$ ,  $\alpha_3 = 0$ , то  $y = q/C$ . Это выражение иногда используют при анализе систем по методу «эффект – стоимость».

Используются и другие формы описания зависимости результата операции от результирующих факторов. Удобно, например, результат представлять в виде полинома от этих факторов.

При исследовании стохастических систем, т. е. систем, на поведение которых существенное влияние оказывают случайные факторы, результат операции  $Y$  будет случайной переменной.

## 1.8. Эффективность операции

### 1.8.1. Эффективность технических систем

В технической литературе встречаются несколько определений эффективности технических систем. В данном учебном пособии мы будем пользоваться следующим определением.

**Эффективность** технической системы – это свойство получать результат  $Y$  её функционирования с учетом *условий применения* системы и с учетом *способов использования активных средств управления* этой системой.

Отметим, что в работе [35] под *эффективностью* понимают степень соответствия реального результата операции желаемому, в работе [21] – степень достижения поставленной цели. Однако в данных определениях речь идёт, по-видимому, о показателях эффективности, которые обсуждаются далее в п. 1.8.2 настоящего учебного пособия.

Исследование операции проводится всегда с точки зрения интересов одного распорядителя (основного субъекта системы), которого называют лицом, принимающим решение (ЛПР).

**Целью исследования эффективности** операции может явиться выработка рекомендаций ЛПР, для рационального выбора стратегий, обеспечивающих с его точки зрения успешный исход операции.

**Управление** есть процесс формирования рационального (разумно обоснованного) поведения системы в операции.

Набор всевозможных взаимоисключающих (альтернативных) способов использования активных средств составляет множество допустимых стратегий  $U$ .

В свою очередь, результирующие факторы зависят от выбранной стратегии. Следовательно, результат операции также будет зависеть от стратегии:

$$Y(u) = Y[g(u), C(u), T(u)].$$

Основная цель управления состоит в том, чтобы обеспечить максимальную эффективность использования активных средств в операции при решении поставленной задачи (при достижении цели).

Выбор стратегии  $u$  из множества допустимых стратегий  $U$  является основным этапом принятия решения.

Процесс подготовки и принятия решений ЛПР, организация их выполнения и контроль составляют сущность управления операцией.

Применительно к космической системе наблюдения операции могут быть направлены:

- на достижение целей функционирования – в штатных условиях эксплуатации;
- на парирование внешних неблагоприятных условий;
- на парирование внутренних неблагоприятных условий.

Элементами операций, направленных на **достижение целей функционирования в штатных условиях эксплуатации**, могут быть:

- планирование порядка съемки объектов наблюдения;
- астроориентация;
- проверка готовности КА к проведению съемки;
- разворот корпуса КА для съемки цели;
- фокусировка оптической системы (наведение на резкость);
- включение фотоприёмного устройства;
- шифровка сигнала;
- запись сигнала в запоминающее устройство;
- поворот антенн на спутник-ретранслятор;
- передача информации;
- разворот корпуса КА для съемки следующей цели и т. д.

Элементами операций, направленных на достижение цели космической системы по *парированию неблагоприятных внешних условий*, могут быть:

- изменение порядка съемки целей, расположенных в полосе обзора космического аппарата;
- изменение орбиты для срочного выхода на «важную» цель;
- использование аппаратуры с различными характеристиками по детальности, размеру ширины полосы обзора в зависимости от поставленных частных задач;
- использование средств защиты космического аппарата от преднамеренного воздействия вероятным противником и др.

Элементами операций, направленных на достижение цели космической системы наблюдения по *парированию неблагоприятных внутренних условий*, могут быть:

- действия, направленные на переключение отказавших элементов бортовых систем на резервные элементы;
- действия, направленные на пополнение запасов электричества, и др.

### *1.8.2. Показатели и критерии эффективности*

#### **Показатели эффективности**

Для выбора рационального пути достижения цели необходимо иметь способ измерения эффективности операции.

*Показатели* эффективности – количественные характеристики свойств эффективности сложной технической системы (ОТС).

Показатель эффективности измеряет степень соответствия реального результата операции желаемому (или степень различия между реальным ее результатом  $Y$  и желаемым результатом  $Y_{mp}$ ). Его можно также трактовать как степень достижимости потенциального результата операции при идеальной стратегии и в идеальных условиях применения.

Показатели эффективности сложной технической системы (ОТС) могут измеряться в тех же величинах, что и показатели качества, или быть безразмерными.

При использовании одинаковой размерности показателей качества и эффективности отличие будет лишь в значении этих показателей. Значения показателей эффективности будут меньше или равны значениям показателей качества, так как показатели эффективности,

как упоминалось, учитывают условия применения и способы использования активных средств сложной технической системы (ОТС).

В этом смысле в задачах исследования операций, где происходит поиск *лучшей стратегии*, показатели качества можно рассматривать как максимально возможные значения показателей эффективности в реальных условиях эксплуатации, то есть как потенциально достижимые показатели эффективности сложной технической системы в идеальных условиях и идеальной стратегии применения активных средств операции.

*Потенциальная эффективность* операции, характеризующаяся предельно выгодным обменом [34], определяется как эффективность операции при *идеальном* способе использования активных средств, т. е. выборе лучшей стратегии. Следовательно, потенциальная эффективность операции зависит лишь от качества активных средств. Поэтому, когда говорят об эффективности технической системы, которая используется как активное средство в некоторой операции, то имеют в виду потенциальную эффективность этой операции.

*Безразмерные* показатели эффективности, как правило, выражают степень соответствия реального результата операции требуемому или потенциально возможному результату для заданных стратегий и условий.

Примеры безразмерного показателя эффективности космической системы наблюдения [31]:

- вероятность обеспечения в течение времени активного существования космического аппарата суточного относительного выходного эффекта космической системы не ниже заданного;

- коэффициент сохранения эффективности - отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы в течение того же периода времени не возникают.

Существует иной подход к определению качества и эффективности [12, 14]. Согласно этому подходу требования, предъявляемые к космическим системам (или аппаратам) наблюдения, условно можно разделить на две группы:

- требования (ограничения), определяющие *пригодность* системы к выполнению своего целевого назначения;

- требования, определяющие выполнение системой или аппаратом заданных функций с *максимальным эффектом* с

ограничениями по затратам массы и других ресурсов (финансовых, трудовых, временных и т.п.) на достижение этого эффекта.

Требования первой группы, как правило, должны задаваться в форме ограничений, а требования второй группы – в форме экстремума (минимума или максимума) показателя, характеризующего эти требования.

Требования первой группы, как правило, относят к категории *качества*, а требования второй группы – к категории *эффективности* космической системы или космического аппарата наблюдения.

То есть разделение показателей КСН, характеризующих ее работу по целевому назначению, на показатели *качества* и *эффективности*, является условным и зависит от решаемой проектной задачи.

В качестве показателей *эффективности* мы можем выбрать любой из приведенных в ТТГ показателей качества, если будем стремиться улучшать эти показатели.

Например, часто ставится задача спроектировать систему с повышенной производительностью. Тогда вместо показателя качества "производительность" следует рассматривать показатель эффективности с тем же названием – "производительность".

### **Критерии эффективности**

На основе показателя эффективности формируется *определенное правило выбора* рационального способа использования активных средств в операции (стратегий).

В качестве такого правила используется *критерий* эффективности.

### **1.8.3. Методологические подходы при исследовании эффективности**

При исследовании эффективности операций используют методологические подходы, основанные на эксперименте и моделировании.

Экспериментальный подход к исследованию эффективности крупномасштабных операций ограничен.

Основной исследовательской концепцией анализа эффективности операций является *моделирование*.

Эксперимент с самой системой заменяется экспериментом с её моделью. Операция, реализуемая  $S_0$ -системой, имитируется в рамках модели  $S_0$ -системы.

При моделировании систем, уровень сложности которых не слишком высок, часто удается вывести математическую зависимость показателя эффективности от управляемых переменных (построить модель) в форме достаточно простой функции с системой ограничений в виде равенств или неравенств и задачу выбора рациональной стратегии поведения свести к одному из классов задач математического программирования. Выбор лучшей стратегии в этом случае обычно сводится к решению оптимизационной задачи одним из методов математического программирования.

Основной формой изучения СТС, используемых в крупномасштабных операциях, является имитационное исследование [43], в основе которого лежит имитационное моделирование.

## 1.9. Эффективность и надёжность

Свойства эффективности по иерархии выше свойств надёжности (см. рис. 1.8). Надёжность является одним из свойств качества (устойчивости), а качество, в свою очередь, – есть составляющая часть эффективности системы.

*Надёжность* – свойство объекта (системы) сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [1].

Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенное сочетание этих свойств.

Чтобы нагляднее понять разницу между свойствами эффективности и надёжности СТС, приведём вкратце пример, заимствованный из научно-фантастического рассказа «Принцип надёжности» [39].

Ученые (будущего) решили поставить эксперимент: как будут развиваться роботы, если им предоставить полную свободу?

Оказалось, что они сумели самоорганизоваться и стали создавать более совершенные роботы.

Однако, начиная с некоторого времени, все поменялось. Самых совершенных роботов держали на последнем ярусе подземелья, а ими командовали роботы попроще. А во главе всей пирамиды управления стал якобы робот, который только умел ослаблять или зажимать гайки на головах подчинённых роботов.

Оказалось, что один из сотрудников лаборатории по прозвищу «Железяка» решил «показать себя», инкогнито проник в зону роботов и изменил принцип управления по принципу надёжности.

В конце, когда всё выяснили, руководитель лаборатории сказал виновнику: «Вы так и не поняли, что основной технический принцип называется не надёжность, а эффективность и надёжность. Он требует, чтобы надёжность служила эффективности, а не наоборот».

Таким образом, проблема эффективности тесно связана с проблемой надёжности. Система с недостаточной надёжностью не может быть эффективным средством достижения поставленной цели.

Можно рассматривать и несколько другой аспект в различии между требованиями к эффективности и надёжности системы, а именно с позиций совершенствования систем и выбора критериев проектирования. Это различие состоит в том, что критерии эффективности служат для выбора оптимальных решений, связанных с обоснованием основных технических характеристик (параметров) сложных изделий и способов их использования, а критерии надёжности — для выбора оптимальных технических решений, связанных с необходимостью сохранения основных технических характеристик изделий и их элементов в течение требуемого промежутка времени.

Анализ эффективности операции позволяет подойти к определению требований к параметрам надёжности средств СТС, используемых в качестве активных средств в операции. Снижение надёжности СТС или ОТС ведет к уменьшению выходного эффекта. В этой связи встаёт вопрос о выборе уровня надёжности СТС, обеспечивающей функционирование СТС с требуемой эффективностью.

**Пример.** Пусть необходимо выбрать показатель надёжности (вероятность безотказной работы) космического комплекса (КК). Прежде всего, необходимо построить зависимость выходного эффекта КК от его надёжности, как это схематично показано на рис. 1.9.

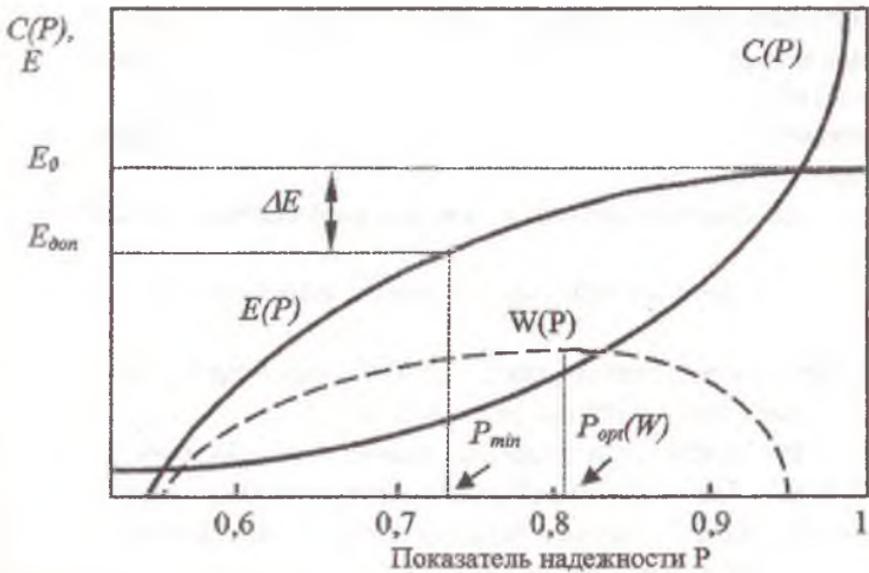


Рис. 1.9. Нормирование показателей надёжности

На рисунке показаны условные графики изменения выходного эффекта  $E(P)$  и стоимости  $C(P)$  создания космического комплекса в зависимости от показателя надёжности  $P$ .

Минимальное значение показателя надёжности  $P_{min}$  находят из условия допустимого уровня потери выходного эффекта:

$$\Delta E = E_0 - E_{дон}(P),$$

где  $E_0$  – выходной эффект при абсолютной надёжности комплекса;

$E_{дон}(P)$  – допустимый выходной эффект.

Оптимальное значение показателя надёжности нетрудно найти, если выходной эффект и затраты на создание КК выражены в единицах стоимости. Для этого необходимо построить функциональную зависимость разности между эффектом и стоимостью

$$W(P) = E(P) - C(P)$$

и исследовать её на безусловный экстремум.

Кривая  $W(P)$  показана на рис. 1.9 пунктирной линией. Максимум функции  $W(P)$  будет соответствовать оптимальному значению показателя надёжности  $P_{opt}$ .

Ещё одним аспектом связи эффективности и надёжности является определение рациональных способов использования имеющихся средств для повышения надёжности создаваемых систем.

Недостаточная надежность проектируемой или существующей системы может явиться проблемой, для решения которой выдвигаются альтернативные цели, например:

- отказ от производства системы или замена её новой, усовершенствованной;
- повышение надежности существующей системы до требуемого уровня;
- улучшение условий эксплуатации существующей системы и т.д.

Далее осуществляется выбор одной из этих целей и организуется операция для достижения выбранной цели.

Эффективность этой операции может быть оценена, например, вероятностью безотказной работы системы в течение заданного времени, если в качестве цели операции выбрано повышение надежности системы. В таком случае *показатель надёжности* системы выступает в качестве *показателя эффективности* операции по повышению надёжности существующей или проектируемой технической системы.

### Контрольные вопросы

1. По каким признакам можно оценивать сложность технических систем?
2. Поясните сущность системного подхода к исследованию эффективности СТС и ОТС.
3. Какие аспекты исследования СТС и ОТС Вы знаете? Поясните некоторые из них.
4. Сформулируйте задачи оценки эффективности ОТС.
5. Какие иерархические уровни исследования эффективности СТС и ОТС Вы знаете? Приведите примеры.
6. Поясните термин «Исследование операций». С целью решения каких задач оценивается эффективность операций?
7. Приведите схему, иллюстрирующую усложняющиеся (вложенные) качества систем.
8. Расскажите о влиянии условий применения систем на их эффективность.
9. Приведите примеры влияния способов использования активных средств в операции на эффективность применения систем.

10. Назовите факторы, формирующие результат операции. Приведите формальные зависимости для представления этих факторов.

11. Что понимается под эффективностью операции?

12. Приведите методологические подходы при исследовании эффективности.

13. Поясните различие терминов эффективность и надёжность. В чём они схожи? Приведите примеры показателей надёжности, которые можно использовать в качестве показателей эффективности.

## 2. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ В ТЕХНИКЕ

### 2.1. Классификация факторов

#### Неуправляемые факторы

Среди факторов, которые учитываются при исследовании эффективности, большая доля факторов не контролируется ЛПР, например, объективные законы природы и общественного развития, которые необходимо учитывать в любом случае.

Неконтролируемыми являются и другие факторы; например, погодные условия, действия конкурентов относят к условиям функционирования (использования) ТС.

#### Управляемые факторы

К *управляемым* факторам относят такие, на которые ЛПР может влиять по своему усмотрению, т. е. которыми он может оперировать в процессе планирования и проведения операции. К ним относят, например, факторы, характеризующие способы применения ТС.

Стратегии  $U$  формируются из множества управляемых факторов.

Условия применения могут формироваться как из множества управляемых, так и неуправляемых факторов.

#### Внешние и внутренние факторы

*Внешние* факторы отражают влияние внешней среды, способствуя успешному проведению операции (полезные факторы) или противодействуя успеху операции (вредные факторы).

*Внутренние* факторы отражают взаимовлияние движущих сил внутри системы на ход и исход операции.

При исследовании систем факторы отображают в виде переменных (числовых и нечисловых). Классификация факторов приведена на рис. 2.1.

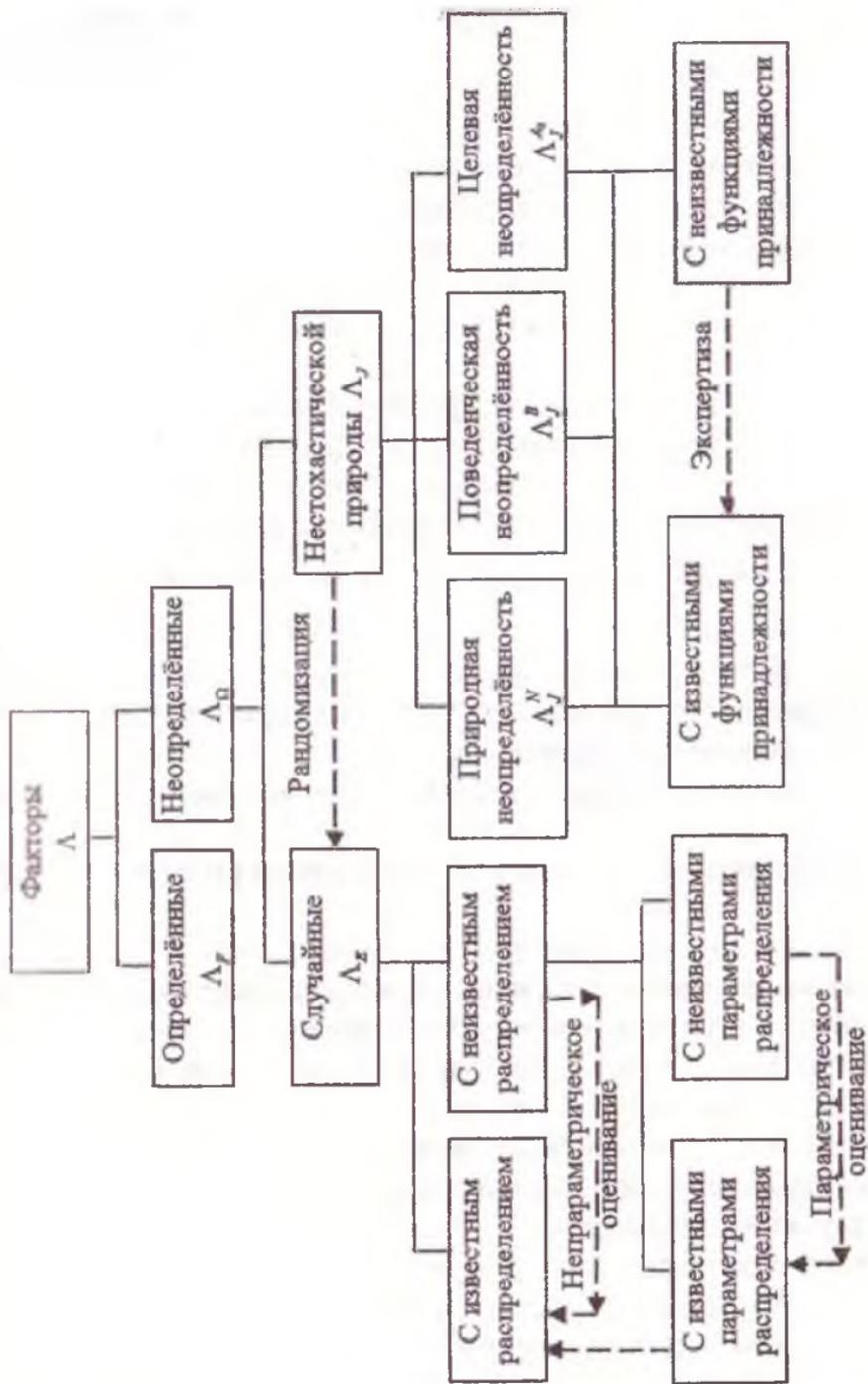


Рис. 2.1. Классификация факторов

## Определённые и неопределённые факторы

С точки зрения информированности исследователя об этих переменных факторы делят на определённые  $\Lambda_F$  и неопределённые  $\Lambda_\Omega$ .

К *определённым* относят переменные, значения которых известны исследователю с требуемой точностью. Это различного рода заданные параметры, известные (регулярные) функции определённых аргументов и т. п. К определённым факторам также относят контролируемые входные воздействия, в том числе и управляемые переменные.

К *неопределённым* относят переменные, о значениях которых в реальном процессе исследователь осведомлен не полностью. Природа неопределённости этих переменных (факторов) может быть различной. Обычно неопределённые переменные делят на две группы: случайные переменные  $\Lambda_E$  и неопределённые переменные нестохастической природы  $\Lambda_J$ .

Если распределение случайной переменной (например, в виде функции распределения) известно, то в этом случае говорят, что переменная статистически определена.

Случайные переменные с неизвестными распределениями делят на два вида:

- с известными параметрами (характеристиками) распределения;
- с неизвестными параметрами.

При исследовании систем со случайными факторами широко используются вероятностно-статистические методы. Например, методами параметрического статистического оценивания можно определить параметры распределения случайных переменных на основе статистических испытаний (если таковые возможны).

Непараметрическое оценивание позволяет установить распределения случайных переменных.

Неопределённость нестохастического характера возникает обычно в силу следующих обстоятельств:

1) наличия целенаправленного противодействия со стороны конкурирующей системы, способы действий которой неизвестны исследователю; эту неопределённость поведения конкурента называют поведенческой неопределённостью  $\Lambda_J^B$ ;

2) недостаточной изученности некоторых явлений, сопровождающих процесс функционирования системы; неопределенность этого типа называют природной  $\Lambda_J^N$ ;

3) нечёткого представления цели операции, приводящего к неоднозначной трактовке соответствия реального результата операции желаемому; такую неопределенность называют целевой  $\Lambda_J^A$ . Например, свободный полёт летчика-аса для поиска и уничтожения вражеских самолетов.

Неопределенные факторы нестохастической природы  $\Lambda_J$  можно условно разделить на две группы:

- с известными функциями принадлежности (диапазонами изменения переменных);

- с неизвестными функциями принадлежности.

Наибольшей степенью неопределенности обладают факторы с неизвестными функциями принадлежности. Обычно к ним применяют процедуру экспертного оценивания диапазонов изменений их значений.

Исследование эффективности технических систем с учетом неопределенных факторов нестохастической природы в значительной мере осложняется отсутствием достаточно общей теории (подобно теории вероятностей для исследования случайных явлений), формирующей методологические основания изучения явлений с неопределенными факторами. Тем не менее, использование теории нечётких множеств, теории игр и теории решений позволяет найти некоторые пути решения задач исследования эффективности систем при наличии существенной неопределенности нестохастического характера.

## 2.2. Нечёткие множества и функции принадлежности

Нечёткое множество – понятие, введённое Лотфи Заде [18, 36]. Он расширил классическое понятие множества, допустив, что функция принадлежности элемента множеству может принимать любые значения в интервале  $[0, 1]$ , а не только значения 0 или 1.

Под нечётким множеством  $A$  понимается совокупность упорядоченных пар, составленных из элементов  $x$  универсального множества  $X$  и соответствующих степеней принадлежности  $\mu_A(x)$ :

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\},$$

где  $\mu_A(x)$  – функция принадлежности (характеристическая функция), указывающая, в какой степени (мере) элемент  $x$  принадлежит нечёткому множеству  $A$ .

В общем случае функция  $\mu_A(x)$  принимает значения в некотором линейно упорядоченном множестве  $M$ . Множество  $M$  называют множеством принадлежностей. Но всё же чаще в качестве  $M$  выбирается отрезок на интервале  $[0, 1]$ .

Функция принадлежности задает некоторое подмножество (подобласть) общей допустимой области изменения фактора, определяемой, например, физической природой соответствующего фактора.

Очевидно, подобласть, определяемая функцией принадлежности, в некотором смысле отражает степень неопределенности фактора.

Разумеется, чем меньше подобласть, определяемая функцией принадлежности, тем меньше степень неопределенности фактора. В пределе функция принадлежности, выделяющая всего одно значение фактора, переводит его в разряд определенных факторов.

В частном случае, если  $M$  состоит только из двух элементов (0 и 1), то нечёткое множество может рассматриваться как обычное, чёткое множество. Для обычного множества функция принадлежности релейна, т. е. принимает значения:

$$\mu_A(d) = \begin{cases} 1, & \text{если } d \in A; \\ 0, & \text{если } d \notin A. \end{cases}$$

Нечёткое множество полностью описывается своей функцией принадлежности и поэтому её обычно используют как обозначение нечёткого множества.

**Пример.** Построить функцию принадлежности суждения об окончательном времени выпадения снега в районе Самары предстоящей зимой.

У различных исследователей свои суждения по этому поводу. Одна из таких функций приведена на рис. 2.2. Ось ординат разбита на декады месяцев.

С этими данными можно поступать как с обычным статистическим материалом, например, получить какую-то усреднённую функцию принадлежности.

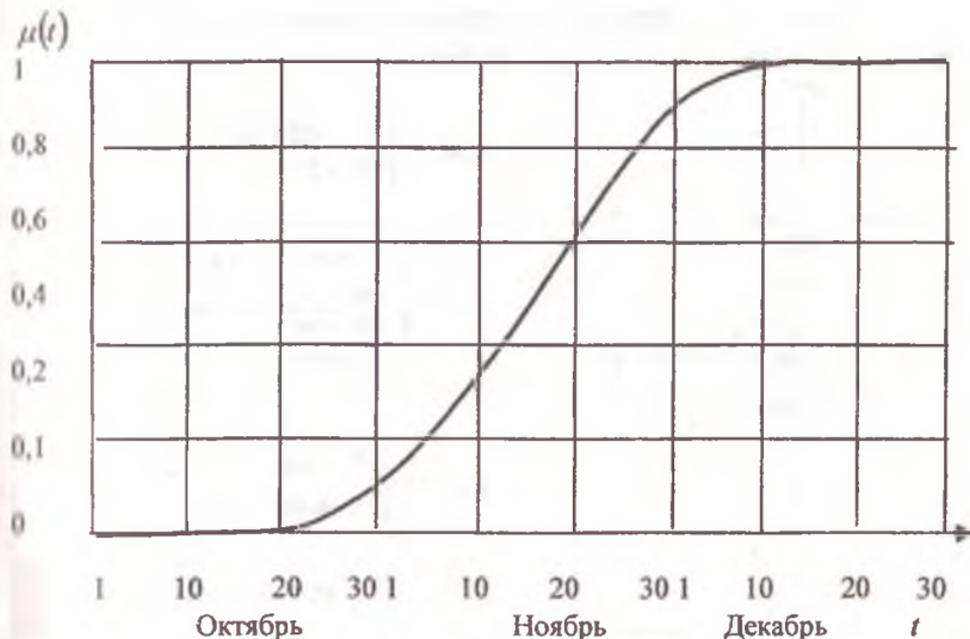


Рис. 2.2. Функции принадлежности к примеру

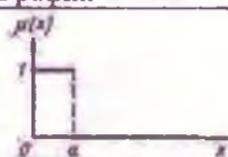
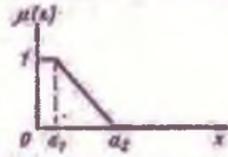
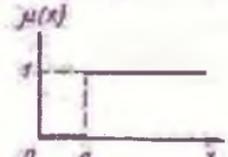
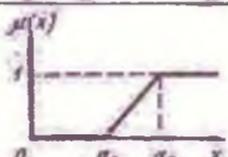
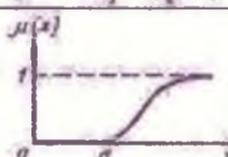
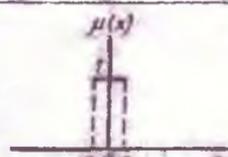
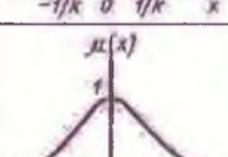
Типовые функции принадлежности суждения приведены в табл. 2.1.

### 2.3. Перевод неопределенных факторов в разряд случайных

Некоторые неопределенности нестохастической природы иногда удается перевести в разряд влучайных факторов с помощью рандомизации. Под рандомизацией понимают искусственное введение случайности в ситуацию, где она отсутствует.

Например, при анализе эффективности технических систем поиска объектов исследователю может быть известен лишь район расположения некоторого объекта. Положение объекта неслучайно. Однако исследователь может предположить, что в пределах известного района положение объекта распределено с постоянной плотностью вероятности. Этим он рандомизировал положение объекта, т. е. ввел искусственно-вероятностное распределение. Далее ситуацию с рандомизацией можно исследовать методами теории вероятностей и математической статистики.

Таблица 2.1. Типовые функции принадлежности суждения

| № п/п | График                                                                              | Функция                                                                                                                                                                     |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     |     | $\mu(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq a, \\ 0, & x > a \end{cases}$                                                                                                    |
| 2     |    | $\mu(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 \leq x \leq a_1, \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1}, & \text{если } a_1 \leq x \leq a_2, \\ 0, & \text{если } a_2 \leq x \end{cases}$ |
| 3     |    | $\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq x < a, \\ 1, & \text{если } a \leq x \end{cases}$                                                                          |
| 4     |    | $\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq x \leq a_1, \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & \text{если } a_1 \leq x \leq a_2, \\ 1, & \text{если } a_2 \leq x \end{cases}$ |
| 5     |    | $\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq x \leq a, \\ 1 - e^{-k(x-a)^2}, & a \leq x, k > 0 \end{cases}$                                                             |
| 6     |   | $\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } -\infty < x < -a, \\ 1, & \text{если } -a \leq x \leq a, \\ 0, & \text{если } a \leq x \end{cases}$                               |
| 7     |  | $\mu(x) = \begin{cases} e^{kx}, & \text{если } -\infty < x \leq 0, \\ e^{-kx}, & \text{если } 0 \leq x < \infty, k > 1 \end{cases}$                                         |
| 8     |  | $\mu(x) = e^{-kx^2}$                                                                                                                                                        |

**Пример.** Поиск пропавшего с радаров самолёта. Иногда полагают, что распределение координат упавшего самолёта при его поиске – равномерное.

## 2.4. Функция принадлежности в виде лингвистической переменной

Иногда функцию принадлежности вводят в виде так называемой лингвистической переменной, т. е. переменной, значения которой определяются предложением в естественном языке. Например, категория «сложность» применительно к системе является лингвистической переменной, а ее значения выражаются словами: не сложная, не очень сложная, сложная, довольно сложная, очень сложная.

В некотором классе систем указанная лингвистическая переменная задает нечеткое множество, например, сложных систем.

На рис. 2.3 показана функция принадлежности  $\mu_{\Omega}(x)$  для значения лингвистической переменной «сложная система», задающая нечеткое подмножество сложных систем на множестве систем с различным числом связей  $x$  между элементами.

В практике для построения функции принадлежности нередко прибегают к экспертному опросу с целью выявления доли экспертов, которые при фиксированном  $x$  отнесли систему к классу сложных. Эта доля экспертов и принимается в качестве значения функции принадлежности  $\mu_{\Omega}(x)$ . Например, если четыре эксперта из десяти систему, имеющую 20 связей, отнесли к классу сложных, то  $\mu_{\Omega}(20) = 0,4$ .

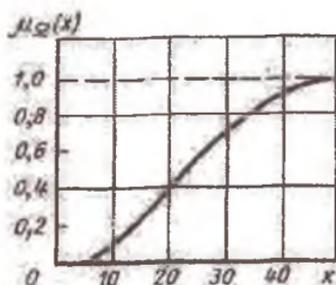


Рис. 2.3. Функция принадлежности нечеткого множества сложных систем

Нередко для описания неопределенных факторов нестохастической природы используют субъективные вероятности. В этом случае при анализе систем применяется теория вероятностей.

Однако при введении субъективных вероятностей закон больших чисел может перестать действовать. Субъективные вероятности вводят обычно с помощью экспертного оценивания.

## Контрольные вопросы

1. По каким признакам можно классифицировать факторы?
2. Что такое «Функции принадлежности»? Приведите примеры.
3. Поясните функцию принадлежности в виде лингвистической переменной.
4. Для какой цели и каким образом осуществляется перевод неопределенных факторов в разряд случайных?

### 3. ШКАЛЫ И ДОПУСТИМЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Любая задача исследования эффективности предполагает измерение всех учитываемых факторов.

При исследовании эффективности потребность в измерении обусловлена необходимостью выразить в числовой мере различные отношения между объектами с тем, чтобы при определении отношений между ними оперировать не с самими объектами, а с соответствующими этим отношениям числовыми мерами.

Без этой формальной процедуры нельзя создать модель, адекватно отображающую реальную ситуацию, а следовательно, и получить сколь-нибудь значимые для практики результаты.

В результате даже самые совершенные модели неспособны нормально, а зачастую и вообще функционировать из-за отсутствия принимаемых процедур объективных и субъективных измерений показателей, характеризующих разнообразные по своей природе факторы, подлежащие учету при исследовании эффективности реальных операций.

Одна из главных проблем измерения в теории эффективности — унификация измерений всевозможных объектов с использованием числовой системы, позволяющей создать общую формальную схему как объективных, так и субъективных измерений.

#### 3.1. Проблема преобразований в различных шкалах

Пусть, например,  $W$  — некоторый показатель, а  $W_1, W_2, W_3$  — его числовые значения, полученные в какой-то шкале измерений.

Рассмотрим числовое утверждение  $W_1 + W_2 > W_3$  и определим его адекватность (осмысленность) для различных шкал измерений.

**Пример 1.** Рассмотрим следующее соотношение для температур объекта, измеренных в шкале Фаренгейта:

$$50^{\circ} F + 100^{\circ} F > 140^{\circ} F . \quad (3.1)$$

Напомним, что температурная шкала Фаренгейта – это шкала, в которой температурный интервал между точками таяния льда и кипения воды (при нормальном атмосферном давлении) разделен на 180 частей – градусов Фаренгейта. Причем точке таяния льда присвоено значение  $32^{\circ}F$ , а точке кипения воды –  $212^{\circ}F$  (см. рис. 3.1).

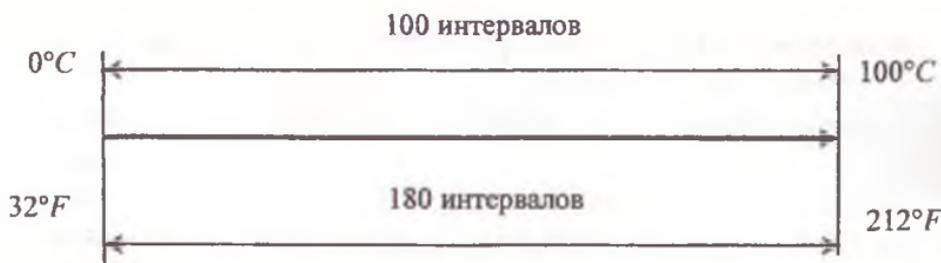


Рис. 3.1. Соотношения шкал температуры по Цельсию и Фаренгейту

Перевод температуры по шкале Фаренгейта в температуру по шкале Цельсия осуществляется по формуле [8]

$$t^{\circ}C = \frac{5}{9}(t^{\circ}F - 32^{\circ}F). \quad (3.2)$$

Преобразуем каждый член выражения (3.1) в шкалу Цельсия по этой формуле:

$$50^{\circ}F \rightarrow \frac{5}{9}(50^{\circ}F - 32^{\circ}F) \rightarrow 10,0^{\circ}C;$$

$$100^{\circ}F \rightarrow \frac{5}{9}(100^{\circ}F - 32^{\circ}F) \rightarrow 37,78^{\circ}C;$$

$$140^{\circ}F \rightarrow \frac{5}{9}(140^{\circ}F - 32^{\circ}F) \rightarrow 60,0^{\circ}C.$$

Подставим эти значения в выражение  $W_1 + W_2 > W_3$ :

$$10,0^{\circ}C + 37,8^{\circ}C > 60,0^{\circ}C.$$

Анализируя полученное соотношение, видим, что оно некорректно.

### 3.2. Измерения показателей

В процессе исследования эффективности ЛПР эксперты, исследователи формируют различные объекты (ситуации, цели, ограничения, стратегии, предпочтения, события, предметы, явления и т. д.) и

измеряют их. Эти измерения могут быть субъективными или объективными, носить качественный или количественный характер.

Субъективные измерения осуществляет человек, поэтому на их результат влияет психология мышления индивида, его знания, опыт и многие другие свойства личности.

Объективные качественные или количественные измерения осуществляются измерительными приборами, действие которых основано на использовании физических законов.

Под *измерением* понимается процедура сравнения объектов по определенным показателям (признакам).

В качестве показателей сравнения объектов используют пространственные, временные, физические, функциональные, экономические, социологические и другие свойства и характеристики объектов (например, показатели надежности технической системы, показатели эффективности операции и др.).

### 3.3. Сравнение показателей

Процедура сравнения включает определение отношений между объектами и способ их сравнения.

Если введены конкретные показатели сравнения, то можно установить отношения между объектами (например, больше, меньше, равны, предпочтительнее и т. д.).

Способы сравнения объектов между собой могут быть различными, например, последовательно с одним объектом, принимаемым за эталон, или друг с другом в упорядоченной или произвольной последовательности.

Пусть  $W$  – показатель эффективности технической системы, который является отображением  $f$  свойств некоего объекта  $D$ . То есть  $W$  является некоторым показателем для выражения отношения между объектами  $D$ , которое условно запишем в форме  $W = f(D)$ .

Пусть также имеется две шкалы, различающиеся отображениями  $f_1$  и  $f_2$  объектов на эти шкалы.

Тогда  $W_1 = f_1(D)$  и  $W_2 = f_2(D)$  – числовые значения показателя  $W$ , полученные для объекта  $D$  эмпирической системы соответственно с помощью отображений  $f_1$  и  $f_2$ .

Возникает вопрос о взаимосвязи числовых значений  $W_1$  и  $W_2$  полученных при отображении одного и того же объекта  $D$ , но в разных шкалах.

Обозначим через  $\varphi(W)$  функцию, устанавливающую связь между значениями  $W_1$  и  $W_2$  показателя  $W$ , т. е.  $W_1 = \varphi(W_2)$ . Функцию  $\varphi(W)$  называют допустимым преобразованием шкалы показателя  $W$  если эта функция служит для выражения того же отношения между объектами, что и показатель  $W$ .

С помощью функции допустимого преобразования  $\varphi(W)$  можно описать связь между любыми числовыми системами, выбираемым для одной и той же эмпирической системы по показателю  $W$ .

Поскольку свойства этой функции характеризуют взаимосвязь между числовыми системами, то её можно использовать для описания понятия единственности отображения.

Множество  $\Phi$  всех допустимых преобразований шкалы показателя  $W$  определяет тип этой шкалы. В этом случае говорят, что показатель  $W$  имеет шкалу типа  $\Phi$ , или что показатель  $W$  измеряется в шкале типа  $\Phi$ .

Шкала считается тем совершенней, чем уже множество допустимых ее преобразований.

Каждый тип шкалы имеет свою информативность и свой класс допустимых преобразований, за пределы которого нельзя выходить без риска получить ошибочные или бессмысленные результаты.

Особое значение это замечание имеет при исследованиях эффективности операций, которая зависит от большого числа различных по характеру и природе факторов, сложным образом связанных и взаимодействующих между собой.

### 3.4. Типы шкал

При измерении показателей наибольшее распространение получили метрические, порядковые и номинальные шкалы (см. рис. 3.2).

Среди метрических шкал выделяют интервальные шкалы, шкалы отношений и абсолютные шкалы. Рассмотрим перечисленные типы шкал в порядке возрастания их совершенства.



Рис. 3.2. Типы шкал

### 3.4.1. Номинальная шкала

Её ещё называют классификационная шкала, или шкала наименований. Это наименее совершенная, простейшая, по существу, качественная шкала. Её применяют для описания принадлежности объектов к определенным классам. В этой шкале число используют лишь для обозначения и выделения объекта: всем объектам одного и того же класса присваивают одно и то же число, а объектам разных классов – разные числа. Однако предпочтение между объектами не устанавливается.

Поскольку существует большое число вариантов присвоения чисел классам эквивалентных объектов, то понятие единственности отображения  $f$  состоит для шкалы наименований во взаимнооднозначности допустимого преобразования  $\varphi$ . Поэтому множеством допустимых преобразований показателя, имеющего номинальную шкалу, являются все виды функциональных преобразований, обладающие свойством однозначности:

$$\Phi_H = \{\varphi(W) | W_1 \neq W_2 \rightarrow \varphi(W_1) \neq \varphi(W_2)\}.$$

Таким образом, номинальная шкала единственна с точностью до взаимнооднозначности соответствия.

Это означает, что в данной шкале отсутствуют понятия масштаба и начала отсчета.

Класс показателей, которые имеет смысл измерять в номинальной шкале, весьма узок. К таким показателям относятся, например, различные решающие правила распознавания образов, используемые для того, чтобы определить, соответствует ли данный образец эталону или нет.

В этой шкале также измеримы любые пороговые функции, значение которых – установить в бинарном коде «да – нет» принадлежность объекта заданному классу (типу, разновидности). Обычно шкалу наименований используют для индексации видов продукции, типов машин, номенклатуры изделий (спецификация изделий), нумерации подразделений в организации и т. п.

### 3.4.2. Порядковая шкала

Порядковая (ранговая) шкала более совершенна, чем номинальная. Её применяют для измерения упорядоченности объектов по одному или совокупности признаков. Числа в ней определяют только порядок следования объектов, но не позволяют утверждать, во сколько или насколько один объект предпочтительнее другого. Для порядковой шкалы допустимое преобразование  $\varphi$  является любым монотонным преобразованием; поэтому эта шкала единственна с точностью до монотонного преобразования. Множество допустимых преобразований показателя, имеющего порядковую шкалу, состоит из всех монотонно возрастающих функций:

$$\Phi_{\Pi} = \{\varphi(W) | W_1 > W_2 \rightarrow \varphi(W_1) > \varphi(W_2)\}.$$

Показатели, измеримые в порядковой (ранговой) шкале, значительно информативнее показателей, измеримых в номинальной шкале, так как позволяют судить об отношениях типа «лучше – хуже» «больше – меньше», существующих между объектами.

Однако в этой шкале также отсутствуют понятия масштаба и начала отсчета, поэтому значения показателей  $W_1$  и  $W_2$ , измеренные в порядковой шкале, не позволяют ответить на вопросы типа: «на сколько (во сколько раз) один объект лучше, важнее другого?».

Наибольшее распространение порядковые шкалы получили при методах обработки экспертной информации о сравнительных оценках качественных свойств объектов.

Оценки такого рода даются в баллах, а сами шкалы часто называют *балльными*.

Балльным оценкам всегда присущ субъективизм, но его доля может быть различной. С этой точки зрения различают два вида балльных оценок: при наличии общепринятого эталона и при отсутствии такового.

### 3.4.3. Шкала интервалов

Шкалу интервалов применяют для отображения различия между свойствами объектов. Эта шкала может иметь произвольные точки отсчета и масштаб.

Множество допустимых преобразований показателя, имеющего шкалу интервалов, состоит только из всех линейных функций вида  $\varphi(W) = aW + b$ , где  $a > 0$ ,  $b$  - произвольное число, т. е.

$$\Phi_{\text{и}} = \{\varphi(W) = aW + b\}.$$

Следовательно, шкала интервалов единственна с точностью до линейного преобразования.

Конкретное измерение показателя в шкале интервалов осуществляется при фиксированных величинах  $a$  (масштаб, задающий единицу измерения) и  $b$  (начало отсчета). Основным свойством шкалы интервалов, определяющим её название, является сохранение отношения интервалов при допустимом преобразовании шкалы. В этой шкале отношение разности чисел в двух числовых системах определяется масштабом измерения.

В шкале интервалов измеряются, например, сроки выполнения различных работ, гарантийные сроки службы узлов, агрегатов, машин и т. п., дата выпуска изделия, начало операции, температура в градусах Цельсия, температура в градусах Фаренгейта и все другие показатели, для измерения которых необходимо фиксировать масштаб и начало отсчёта.

### 3.4.4. Шкала отношений

Шкала отношений является частным случаем шкалы интервалов при выборе нулевой точки отсчета ( $b = 0$ ). Однако эта шкала более совершенна, чем шкала интервалов, так как для нее соответствующее множество  $\Phi_0$  всех допустимых преобразований состоит только из преобразований подобия:

$$\Phi_0 = \{\varphi(W) = aW\}.$$

В шкале отношений числа отражают отношения свойств объектов, т. е. во сколько раз свойство одного объекта превосходит это же свойство другого объекта.

Измерения по этой шкале допускают сравнение не только самих значений показателей или их разностей, но и различных арифметических комбинаций этих значений, если, конечно, они имеют физический смысл.

Показатели, измеряемые в шкале отношений, наиболее распространены в технике, математике и, конечно, в теории эффективности.

В качестве примеров таких показателей можно указать длину, массу, напряжение, стоимость и другие, для которых существует естественное начало отсчета (нулевая точка).

Масса: дань (150 кг зерна), фунт, тин (КНР), кг и др.

Длина: локоть, аршин, фут, метр, миля и др.

### 3.4.5. Абсолютная шкала

Абсолютная шкала – самая совершенная. В этой шкале принимается нулевая точка отсчета ( $b = 0$ ) и единичный масштаб ( $a = 1$ ). Для абсолютной шкалы соответствующее множество  $\Phi_A$  допустимых преобразований состоит всего из одного элемента, представляющего собой тождественное преобразование, т. е.

$$\Phi_O = \{\varphi(W) = aW\}.$$

Это означает, что существует одно и только одно отображение объектов в числовую систему. Отсюда следует и название шкалы, так как для нее единственность отображения понимается в буквальном, абсолютном смысле.

В абсолютной шкале определяется, например, количество объектов (предметов, событий и т. п.), которое может быть измерено единственным образом с помощью ряда натуральных чисел. Примером абсолютных шкал являются шкала температур по Кельвину, шкала значений вероятности события и др.

Таким образом, показатели могут иметь шкалы различных типов. Это дает возможность дать более точное определение количественного и качественного показателя.

*Количественными показателями* называют такие показатели, которые имеют шкалу не менее совершенную, чем интервальная.

*Качественными показателями* называются такие показатели, которые имеют шкалу менее совершенную, чем интервальная.

## 3.5. Проблема адекватности числовых утверждений

Тип шкалы необходимо учитывать всегда, когда речь идет о том, какие действия имеет смысл осуществлять с числовыми значениями рассматриваемого показателя. В теории измерений эту проблему на-

являются *проблемой адекватности* (осмысленности) числовых утверждений. Суть ее состоит в том, что числовое утверждение полагают адекватным тогда и только тогда, когда его значение истинности инвариантно относительно допустимых преобразований шкалы.

Пусть, например,  $W$  – некоторый показатель, а  $W_1, W_2, W_3$  – его числовые значения, полученные в шкале интервалов, т. е.

$$\varphi(W) = aW + b.$$

Рассмотрим числовое утверждение  $W_1 + W_2 > W_3$  и определим его адекватность (осмысленность). В этом случае

$$(aW_1 + b) + (aW_2 + b) > (aW_3 + b).$$

Очевидно, что это утверждение неэквивалентно исходному, и поэтому при измерении  $W$  в шкале интервалов утверждение  $W_1 + W_2 > W_3$  не имеет смысла (см. пример 1).

В то же время при измерении показателя  $W$  в шкале отношений, т. е.  $\varphi(W) = aW$ , утверждение  $W_1 + W_2 > W_3$ , как можно видеть, является осмысленным.

### 3.6. Выбор шкалы

Выбор той или иной шкалы для измерения определяется характером отношений между объектами эмпирической системы, наличием информации и целями исследования.

Применение количественных шкал требует значительно более полной информации об объектах по сравнению с применением качественных шкал, а получение такой информации связано с затратами времени и ресурсов.

Поэтому прежде всего необходимо обращать внимание на правильное согласование выбираемой шкалы с целями исследования.

Если, например, эта цель состоит в упорядочении объектов, то нет необходимости измерять количественные характеристики объектов, достаточно определить только качественные характеристики.

Законы функционирования исследуемых сложных систем могут быть изучены не столь тщательно и полно, чтобы по ним можно было легко определить класс допустимых преобразований и соответствующую ему шкалу того или иного показателя. В этих случаях целесообразней вначале использовать шкалу с максимально широким

классом допустимых преобразований, при котором значение показателей еще содержит информацию, необходимую для начального этапа решения поставленной задачи. В дальнейшем, по мере получения информации, можно уточнять класс допустимых преобразований, переходить к более совершенным шкалам.

Продемонстрируем выбор шкалы применительно к исследованию целевого функционирования КА наблюдения с противодействием. На рис. 3.3 представлена упрощенная сетевая модель целевой работы КА. События и виды работ представлены на поле рисунка. Принятые сокращения: ПД - противодействие; ПКС - противокосмические средства; ЛЦ - ложные цели.



Рис. 3.3. Сетевая модель целевой работы космического аппарата наблюдения с противодействием

На начальных этапах исследования может быть использована номинальная двоичная шкала (Да – Нет, Истина, Ложь, True – False).

$Y = 0$ ), если в качестве показателей эффективности отдельных событий принимать наступление того или иного события. Если в качестве показателя эффективности принять событие получения целевого эффекта, то в этом случае также можно использовать номинальную двоичную шкалу. Для оценки такого показателя можно составить следующую логическую функцию достижения целевого эффекта:

$$Y = x_{12}x_{23}x_{34}x_{45} \vee x_{16}x_{67}x_{72}x_{23}x_{34}x_{45} \vee \\ \vee x_{16}x_{68}x_{89}x_{92}x_{23}x_{34}x_{45} \vee x_{16}x_{610}x_{1011}x_{115},$$

где знаком  $\vee$  обозначена операция дизъюнкции рассматриваемых событий, знаки операции конъюнкции  $\wedge$  между рассматриваемыми событиями опущены, хотя они подразумеваются.

Если в качестве показателя эффективности используется вероятность выполнения целевой задачи в условиях противодействия, то уже должна использоваться абсолютная шкала - шкала вероятностей. Для оценки такого показателя можно использовать логико-вероятностные методы исследования структурно-сложных систем [31] и перейти к вероятностной функции

$$P(Y) = P(x_{12}x_{23}x_{34}x_{45} \vee x_{16}x_{67}x_{72}x_{23}x_{34}x_{45} \vee \\ \vee x_{16}x_{68}x_{89}x_{92}x_{23}x_{34}x_{45} \vee x_{16}x_{6,10}x_{10,11}x_{11,5}).$$

На более поздних этапах создания КА модели вероятностных функций можно разрабатывать с использованием других методов.

### 3.7. Прямые и косвенные измерения

Необходимо различать *первичные* и *производные* измерения показателей. Последние называют еще косвенными измерениями. Они не зависят от эмпирической системы, а реализуются с помощью специальных вычислительных процедур, позволяющих получать числовое значение показателя на основе преобразования по определенным алгоритмам или формулам числовых значений величин, полученных прямыми измерениями. При исследовании эффективности операций (технических систем) этот прием используется очень широко. Например, угол атаки крыла гиперзвукового самолета рассчитывается как разность между углом тангажа и углом наклона траектории. В свою очередь, угол тангажа определяется с помощью гиригоризонта (гироскопического прибора), а угол наклона траектории рассчитыва-

ется по измерениям кажущейся скорости. Кажущаяся скорость измеряется с помощью гириноинтегратора продольных ускорений.

### **Контрольные вопросы**

1. В чём состоит проблема преобразований в различных шкалах? Приведите примеры.

2. Поясните суть различных шкал измерений, их отличия и области применения:

- номинальной шкалы;
- порядковой шкалы;
- шкалы интервалов;
- шкалы отношений;
- абсолютной шкалы.

3. Поясните, какие шкалы следует выбирать для тех или иных задач оценивания эффективности. Приведите пример выбора шкалы (для целевого функционирования КА наблюдения с противодействием).

4. В чём состоит различие прямых и косвенных измерений?

## 4. ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Показатель эффективности  $W(u)$  операции есть мера степени соответствия реального результата операции требуемому.

Показатель эффективности  $W(u)$  зависит от стратегии  $u$ . Он определяется на множестве допустимых стратегий  $U$ . В общем виде эта зависимость задается отображением

$$\Psi: U \rightarrow W,$$

т. е. отображением множества допустимых стратегий  $U$  во множество значений показателя эффективности  $W$ . Обычно отображение  $\Psi$  задается в форме определенной математической модели операции, о которой речь пойдет позже.

### 4.1. Требования к показателям эффективности и меры выражения результата

#### 4.1.1. Требования к показателям эффективности

Числовая функция, определённая на множестве стратегий  $U$ , характеризующая степень достижения цели  $A_0$  операции, может рассматриваться в качестве показателя эффективности лишь при соблюдении определенных требований, представленных ниже.

**А. Соответствие цели.** Цель операции  $A_0$  отображается в требуемый результат  $Y^{mp}$ . ЛПР, зная значение показателя результата операции  $Y$  в той или иной ситуации, полностью представляет себе, в какой степени достигается цель.

**Пример.** Цель операции строительной организации по строительству жилья – получение прибыли. Тогда  $Y^{mp}$  – есть прибыль. Ошибочно можно принять, что цель – обеспечение жильем населения. Обеспечение жильём может быть целью операции, но не строительной организации, а, например, департамента строительства. В этом случае в качестве требуемого результата  $Y^{mp}$  может быть принято количество построенных квартир или квадратных метров.

**Б. Содержательность.** Сам показатель эффективности (или его компоненты) должен быть понятен ЛПР и иметь ясный физический, экономический или иной смысл.

**В. Измеримость.** Показатели эффективности можно подвергать определенным математическим преобразованиям, допускаемым типом его шкалы.

**Г. Интерпретируемость.** То есть истолкованием полученных математических зависимостей и результатов применительно к рассматриваемой конкретной области.

**Д. Соответствие системе предпочтений ЛПР.**

**Е. Минимальность числа используемых частных показателей.** Человек может достаточно легко оперировать с одним – тремя показателями без использования машинных методов обработки. В зависимости от степени подготовленности ЛПР верхняя граница размерности векторного показателя определяется величиной  $7 \pm 2$ , при этом с ростом числа показателей увеличивается время анализа получаемых результатов.

**И. Полнота.** Векторный показатель эффективности должен содержать такое количество частных показателей, которое позволяло бы учитывать все определяющие признаки  $Y$ , адекватно отражающие результат операции.

Рассмотрим подробнее некоторые из требований.

#### *4.1.2. Измеримость показателей*

Показатель эффективности может измеряться как в метрической, так и порядковой шкалах. Для описания соответствия реального результата операции  $Y$  требуемому результату формально вводят числовую функцию на множестве результатов операции:

$$\rho = \rho[Y(u), Y^{mp}], \quad (4.1)$$

которую называют функцией соответствия.

Например, если строительная организация запланировала получить 100 млн. руб. прибыли ( $Y^{mp}$ ), а получила ( $Y(u)$ ) 80 млн. руб., то числовая функция  $\rho$  может быть выражена не только в рублях, но и в процентах (80%) или в долях выполнения плана (0,8), баллах или других единицах измерения.

Эта функция в некоторой шкале показывает степень достижения цели операции, а конкретный вид функции соответствия зависит от

цели операции, задачи исследования и других факторов. В силу того, что  $Y(u)$  может быть случайной переменной (числовой или нечисловой), функция соответствия также может быть случайной величиной (как числовая функция случайного аргумента). В некоторых задачах и  $Y^{mp}$  приходится вводить как случайную переменную.

Если результат выражается случайной переменной, то запись  $Y(u)$  означает, что распределение  $Y$  зависит от стратегии  $u \in U$ . В этом случае функцию распределения  $F_u(y)$  будем записывать с индексом  $u$ , так как вид ее зависит от  $u$ .

Введение в рассмотрение функции соответствия (4.1) позволяет принять математическое ожидание этой функции в качестве показателя эффективности  $W(u)$ , т. е.

$$W(u) = M \{ \rho [ Y(u), Y^{mp} ] \}, \quad (4.2)$$

где  $M[\cdot]$  - операция математического ожидания.

Если  $Y(u)$  и  $Y^{mp}$  - неслучайные переменные, то

$$W(u) = \rho [ Y(u), Y^{mp} ],$$

т. е. в детерминированном случае функция соответствия служит показателем эффективности операции.

#### **4.1.3. Соответствие показателя эффективности системе предпочтений ЛПР**

Это требование означает, что показатель эффективности должен учитывать психологические особенности лица, принимающего решение (ЛПР), отражающие его отношение к различным ситуациям в условиях неопределенности (например, склонность, несклонность или безразличие к риску).

Формально психологические особенности ЛПР можно учесть введением специальной оценочной функции  $f^{\theta c}(\rho)$ , отражающей отношение ЛПР к риску.

Например, три различных руководителя (А, Б и В) могут ввести разные оценочные функции применительно к предыдущему примеру, как это показано в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Значения оценочной функции двух руководителей

| Значение функции соответствия $\rho$ | $f_A^{\theta c}(\rho)$<br>(в баллах) | $f_B^{\theta c}(\rho)$<br>(в баллах) | $f_B^{\theta c}(\rho)$<br>(в баллах) |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| $\rho = 100\%$                       | 50                                   | 4                                    | 1                                    |
| $\rho = 90\%$                        | 45                                   | 3                                    | 0                                    |
| $\rho = 80\%$                        | 40                                   | 2                                    | 0                                    |
| $\rho < 80\%$                        | 35                                   | 0                                    | 0                                    |

Если  $f^{\theta c}(\rho)$  – случайное, то показатель эффективности  $W$  есть математическое ожидание оценочной функции:

$$W(u) = M \{ f^{\theta c} \{ \rho [Y(u), Y^{mp}] \} \}. \quad (4.3)$$

#### 4.1.4. Векторные показатели эффективности

Если результат  $Y$  операции может быть описан единственной величиной  $y$ , то (4.2) и (4.3) определяют скалярные показатели эффективности. В противном случае приходится вводить векторный показатель эффективности

$$W(u) = \|W_1(u), W_2(u), \dots, W_m(u)\|^t, \quad (4.4)$$

где  $W_i(u)$ ,  $i = \overline{1, m}$  определяется по правилу (4.2) с подстановкой вместо  $Y(u)$ ,  $Y^{mp}$  величин  $y_i(u)$ ,  $y_i^{mp}$  частных характеристик исхода, т.е.

$$W_i(u) = M \{ \rho [y_i(u), y_i^{mp}] \}, \quad i = \overline{1, m}.$$

Введение векторного показателя эффективности накладывает дополнительные требования: минимальности числа частных показателей и полноты.

Обычно векторный показатель вводят в случаях, когда единственная цель операции достигается решением нескольких задач, эффективность решения каждой из которых оценивается соответствующим частным показателем  $W_i(u)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , но свернуть эти показатели в один обобщенный показатель не удается.

Эти частные задачи могут решаться отдельными подсистемами, входящими в общую систему  $S_0$ , и тогда  $W_i(u)$  есть показатель эффективности частной операции, проводимой  $i$ -й подсистемой.

Кроме того, эти задачи могут решаться одной системой, но на разных этапах операции, и тогда  $W_i(u)$  есть показатель эффективности решения задачи на  $i$ -м этапе операции.

**Пример.** Показатели эффективности КА наблюдения:

- детальность (линейное разрешение на местности) или обратная величина – разрешающая способность на местности;
- периодичность наблюдения одного и того же наземного объекта на различных витках полета;
- производительность съемки в количестве объектов наблюдения или отснятой площади за виток, сутки полета, за срок активного существования;
- оперативность доставки видеоинформации на наземные пункты приема.

Космический аппарат наблюдения как система не имеет отдельных подсистем, предназначенных конкретно для получения приведенных показателей эффективности. Данные показатели получаются в результате работы одной системы на различных этапах операции.

## 4.2. Формы показателя эффективности

Показатель эффективности в форме (4.3) является наиболее общим. В зависимости от вида оценочной функции  $f^{\theta c}(\cdot)$  и функции соответствия  $\rho[Y(u), Y^{mp}]$  из (4.3) можно получить различные показатели эффективности.

Покажем это на примере скалярных показателей, часто используемых при исследованиях эффективности технических систем.

С целью отличия случайной величины от ее возможного значения, когда это не ясно из контекста, над соответствующей буквой будем ставить символ  $\wedge$ . Например,  $\hat{\rho}$  – случайная величина,  $\rho$  – ее возможное значение.

### 4.2.1. Показатель среднего результата

При исследовании эффективности операций широко распространен показатель среднего результата, т. е.

$$W(u) = M[y(u)]. \quad (4.5)$$

Этот показатель используется в тех случаях, когда цель операции выражается числовой переменной. Очевидно, что (4.5) является

частным случаем показателя (4.2), при котором функция соответствия равна реальному результату:

$$\rho[y(u), y^{mp}] = y(u).$$

Вводя показатель среднего результата и зная, например, диапазон изменения результата, исследователь может сравнить его значение с предельно большим значением.

Важным свойством показателя среднего результата является его аддитивность, т. е.

$$M\left[\sum_i \hat{y}_i\right] = \sum_i M[\hat{y}_i]. \quad (4.6)$$

Если результат операции  $\hat{y}(u)$  представим в виде суммы результатов действий подсистем ( $\hat{y} = \sum \hat{y}_i$ ), то средний результат операции равен сумме средних частных результатов, несмотря на возможную их стохастическую зависимость.

**Пример 1.** Определить производительность системы, состоящей из двух КА наблюдения, если производительность первого КА составляет 20 объектов за виток полета, а второго – 30.

Воспользовавшись формулой (4.6), получаем  $20+30=50$ .

Однако такое может быть не для всех показателей эффективности среднего результата.

**Пример 2.** Определить периодичность системы КА наблюдения  $t_c^{nep}$ , состоящей из двух КА, если периодичность первого КА составляет  $t_1^{nep}=24$  часа, а второго –  $t_2^{nep}=12$  часов.

Очевидно, что складывать отдельные показатели нельзя.

В чем же здесь дело?

Дело в том, что увеличение количественного показателя периодичности приводит к снижению качества системы и свойство аддитивности «не работает». Попытаемся оперировать обратными величинами (частотой съёмки) и проверить это свойство:

$$\frac{1}{t_c^{nep}} = \frac{1}{t_1^{nep}} + \frac{1}{t_2^{nep}}.$$

Разрешая это уравнение относительно  $t_c^{nep}$ , получаем

$$t_c^{nep} = \frac{1}{\frac{1}{t_1^{nep}} + \frac{1}{t_2^{nep}}} = \frac{1}{\frac{1}{24} + \frac{1}{12}} = 8 \text{ (часов)}.$$

Таким образом, для соблюдения аддитивности необходимо, чтобы увеличение численного значения результата операции соответствовало улучшению качества системы, а не наоборот.

#### **4.2.2. Показатель эффективности как вероятность случайного события**

Пусть цель операции описывается случайным событием  $A$ , наступление которого является желательным результатом операции. Комплекс условий, а следовательно и вероятность  $P_u(A)$  наступления этого события, зависят от стратегии  $u \in U$ . Функцию соответствия  $\rho$  в этом случае вводят как бернуллиеву переменную, которая может принять лишь два значения: 0 или 1, т. е.

$$\rho[y(u), y^{mp}] = \begin{cases} 1, & \text{если событие } A \text{ наступило;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4.7)$$

Очевидно, при таком введении функции соответствия  $y^{mp} = 1$ . Вероятность события  $A$  есть математическое ожидание бернуллиевой переменной или функции соответствия (4.7). Действительно,

$$M\{\rho[y_i(u), y_i^{mp}]\} = 1 \cdot P_u(A) + 0 \cdot P_u(\bar{A})$$

и, следовательно, показатель эффективности в форме (4.7) есть вероятность наступления события  $A$ :

$$W(u) = P_u(A).$$

#### **4.2.3. Показатель эффективности как вероятностная гарантия выполнения поставленной задачи**

Часто событие  $A$  выражается соотношением между реальным результатом  $y(u)$  и требуемым  $y^{mp}$ . Например,

$$A_1 = \{\hat{y}(u) \geq y^{mp}\} \text{ или } A_2 = \{y_1^{mp} \leq \hat{y}(u) < y_2^{mp}\}.$$

Функции соответствия для этих событий вводятся следующим образом: для события  $A_1$

$$\rho[y(u), y^{mp}] = \begin{cases} 1, & \text{если } \hat{y}(u) \geq y^{mp}; \\ 0, & \text{если } \hat{y}(u) < y^{mp}; \end{cases} \quad (4.8)$$

для события  $A_2$

$$\rho[y(u), y^{mp}] = \begin{cases} 1, & \text{если } y_1^{mp} \leq \hat{y}(u) < y_2^{mp}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Например, пусть качество фотоснимков считается удовлетворительным, если степень повреждения площади объектива метеорными частицами будет менее определённой. Тогда можно использовать функцию соответствия (4.6).

Функцию соответствия (4.6) употребляют в случаях, когда требуемый результат задачи и его достижение являются неизменным условием выполнения поставленной задачи. При этом показатель эффективности

$$W(u) = P\{\rho[y(u), y^{mp}]\} = P\{\hat{y}(u) \geq y^{mp}\} \quad (4.9)$$

трактруется как вероятностная гарантия (или степень гарантии) выполнения поставленной задачи.

**Пример.** Пусть цель операции заключается в обеспечении повышения срока службы изделия до уровня, не ниже требуемого  $y^{mp}$ , тогда показатель эффективности операции (4.9) есть степень гарантии или вероятность того, что срок службы изделия будет не менее требуемого. При известной функции распределения реального результата  $F_u(y)$  (4.9) показатель эффективности записывают так:

$$W(u) = 1 - F_u(y^{mp}).$$

На рис. 4.1 изображена функция распределения результата операции и показана схема оценки вероятностной гарантии

$$P\{\hat{y}(u) \geq y^{mp}\}.$$

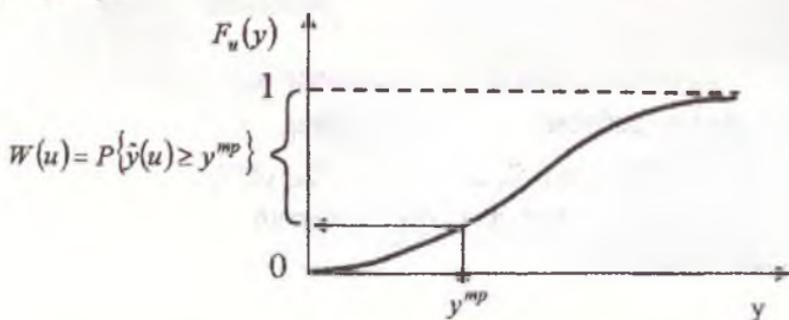


Рис. 4.1. Функция распределения результата операции

На рис. 4.2 представлена противоположная функции распределения, а именно функция, которую можно трактовать как функцию надёжности достижения результата операции. Видно, что вероятность  $P\{\hat{y}(u) \geq y^{mp}\}$  осталась той же, но на графике она сместилась.

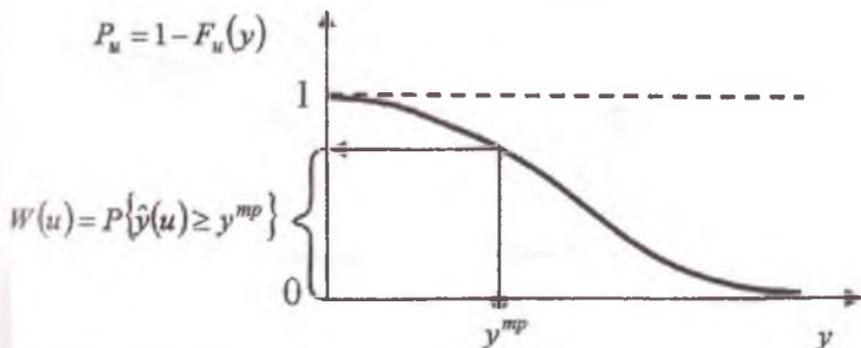


Рис.4.2. Функция надёжности (результата операции)

#### 4.2.4. Показатель эффективности как вероятностно-гарантированный результат

В качестве показателя эффективности операции наряду с (4.9) может быть принят минимальный результат  $y_\gamma$ , получаемый с заданной вероятностью  $\gamma$ , т. е.

$$\gamma = P(\hat{y} \geq y_\gamma). \quad (4.10)$$

Поскольку  $F(\hat{y}) = P(\hat{y} \leq y^{mp})$  или  $P(y^{mp} \geq \hat{y}) = 1 - F(\hat{y})$ , то

$$\gamma = P(\hat{y} \geq y_\gamma) = 1 - F(y_\gamma),$$

где  $F(y)$  — функция распределения реального результата операции (случайной величины  $y(u)$ ).

Решив это уравнение относительно  $y_\gamma$ , получим

$$y_\gamma = F^{-1}(1 - \gamma). \quad (4.11)$$

Здесь  $y_\gamma$  есть обратная функция к функции распределения  $F(y)$  при значении аргумента  $\alpha = 1 - \gamma$  распределения  $F(y)$ , то есть  $y_\gamma$  — квантиль. Напомним, что квантилью называется аргумент функции распределения при заданной вероятности. Квантиль (суц. женского рода) — показатель (мера) позиции внутри распределения.

На рис. 4.3 изображена функция распределения результата операции и показан гарантированный результат (см. переход от  $\alpha = 1 - \gamma$  к  $y_\gamma$ ).

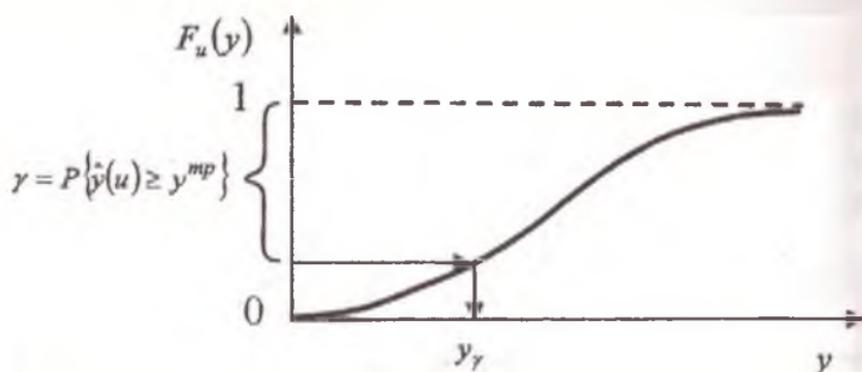


Рис. 4.3. Функция распределения результата операции.  
Гарантированный результат

При этом функция соответствия

$$\rho = F^{-1}(1 - \gamma) \quad (4.12)$$

есть величина неслучайная и ее математическое ожидание, следовательно, равно  $\rho$ .

Требуемый результат косвенно отражает заданный (требуемый) уровень вероятности (степень гарантии).

Отметим, что показатель эффективности в форме (4.2) имеет вид

$$W(u) = M[\rho] = y_\gamma. \quad (4.13)$$

#### 4.2.5. Показатель эффективности при случайных величинах полученного и требуемого результатов

В практике оценки эффективности операций приходится иногда учитывать случайный характер требуемого результата.

**Например,** в качестве результата операции по повышению надежности технической системы можно потребовать, чтобы срок её безаварийной работы был не менее периода времени активных работ с использованием этой системы (рис. 4.4).

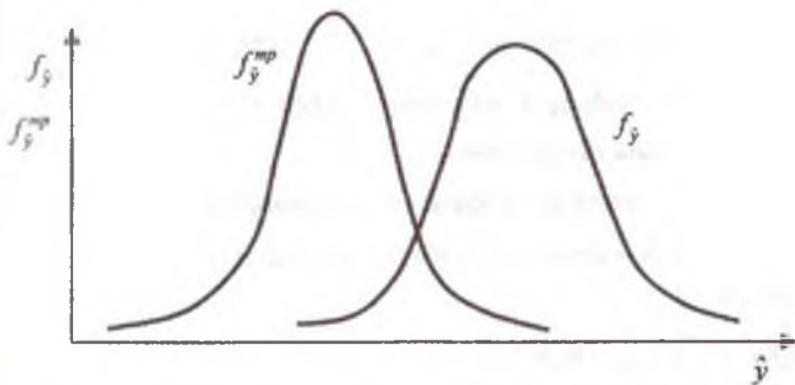


Рис. 4.4. Плотности распределения случайных величин

Здесь срок безаварийной работы и период времени активных работ могут иметь случайный характер, т. е. требуемый результат в этих условиях описывается случайной переменной  $\hat{y}^{mp}$ , которую обычно называют минимально необходимым результатом.

Если  $\hat{y}^{mp}$  — случайная величина (числовая случайная переменная), то ее распределение вводят обычно с помощью функции распределения  $F_u(y^{mp})$ .

В случаях, когда целью операции является достижение результата  $\hat{y}(u)$  не ниже требуемого уровня  $\hat{y}^{mp}$  при случайном характере последнего, функцию соответствия можно ввести по аналогии с (4.8):

$$\rho[\hat{y}(u), \hat{y}^{mp}] = \begin{cases} 1, & \text{если } \hat{y}(u) \geq \hat{y}^{mp}; \\ 0, & \text{если } \hat{y}(u) < \hat{y}^{mp}. \end{cases} \quad (4.14)$$

Показатель эффективности

$$W(u) = M\{\rho[\hat{y}(u), \hat{y}^{mp}]\} = P[\hat{y}(u) \geq \hat{y}^{mp}]$$

в рассматриваемых условиях представляет собой математическое ожидание функции соответствия (4.14) и является вероятностной гарантией того, что реальный результат будет не менее требуемого при случайном характере как реального, так и требуемого результатов.

**Вычисление показателя эффективности по функциям распределения случайных величин**

Введем в рассмотрение совместную плотность распределения  $f(y, y^{mp})$  случайных величин  $y$  и  $y^{mp}$ . Галочки в обозначениях случайных величин опустим для упрощения написания. Область допус-

тимых значений, параметров  $y$  и  $y^{mp}$ , при которых соблюдается условие  $y \geq y^{mp}$  (область надежной работы элемента), показана рис. 4.5 и выделена штриховкой.

Если взять интеграл от функции плотности  $f(y, y^{mp})$  по области  $\Omega$ , то получим вероятность безотказной работы элемента, то есть его надёжность

$$P(y \geq y^{mp}) = \int_{\Omega} f(y, y^{mp}) dy dy^{mp}, \quad (4.15)$$

где  $y$  и  $y^{mp}$  – переменные интегрирования.

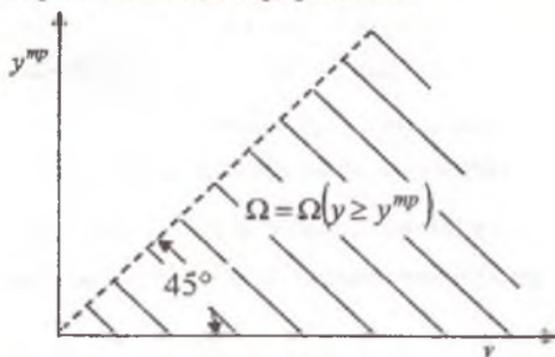


Рис. 4.5. Область надежной работы элемента

Поскольку случайные величины  $y$  и  $y^{mp}$  независимы, то совместную плотность  $f(y, y^{mp})$  можно представить как произведение

$$f(y, y^{mp}) = f(y)f(y^{mp}),$$

где  $f(y)$  и  $f(y^{mp})$  – плотности распределения случайных величин  $y$  и  $y^{mp}$  соответственно.

Чтобы при интегрировании выражения (4.15) остаться в области  $\Omega$ , необходимо изменять параметр  $y$  от 0 до  $\infty$ , а  $y^{mp}$  – от 0 до значения  $y = y^{mp}$ . Тогда можно получить

$$\begin{aligned} P(y \geq y^{mp}) &= \int_{\Omega} f(y, y^{mp}) dy dy^{mp} = \int_0^{\infty} \int_0^{y=y^{mp}} f(y)f(y^{mp}) dy dy^{mp} = \\ &= \int_0^{\infty} f(y) \left[ \int_0^{y=y^{mp}} f(y^{mp}) dy^{mp} \right] dy. \end{aligned}$$

Учитывая, что

$$\left[ \int_0^{y=y^{mp}} f(y^{mp}) dy^{mp} \right] = F(y^{mp})$$

где функция распределения, окончательно получаем

$$P(y \geq y^{mp}) = \int_0^{\infty} f(y) F(y^{mp}) dy.$$

С помощью данной зависимости можно вычислить значение показателя эффективности по известным функциям распределения случайных величин.

#### ***4.2.6. Показатель эффективности как средняя мера превышения случайной величины полученного результата над неопределённой величиной требуемого результата***

Допустим, что имеет место некоторая неопределенность при осуществлении требуемого результата операций  $y^{mp}$ . Если эта неопределенность нестохастического характера, то можно ввести функцию принадлежности  $\mu_A(y)$  для нечёткого случайного события  $A = \{ \hat{y}(u) \geq \tilde{y}^{mp} \}$ . Нечёткую (лингвистическую) переменную будем сверху снабжать символом «~». В записи события  $A$  переменная  $\hat{y}(u)$  является случайной величиной с функцией распределения  $F_u(y)$ , но  $\tilde{y}^{mp}$  есть неопределенная переменная нестохастического характера с функцией принадлежности  $\mu_A(y)$ .

Нечеткое случайное событие  $A$  введем следующим образом.

Как известно из теории вероятностей, случайное событие  $A$  есть подмножество пространства элементарных событий  $E$ , т. е.  $A \subset E$ . Предположим теперь, что  $A$  есть нечёткое подмножество  $E$ , заданное функцией принадлежности  $\mu_A$  (для простоты будем пока рассматривать случай, когда  $E$  не более чем счётно). Теперь каждому элементарному событию  $e_i \in E$  следует поставить в соответствие не только вероятность его наступления  $P(e_i)$ , но и степень принадлежности  $e_i$  подмножеству  $A$ , т. е.  $\mu_A(e_i)$ , ( $0 \leq \mu_A(e_i) \leq 1$ ). Чтобы найти вероят-

ность наступления нечеткого случайного события  $A$ , следует по всем элементарным событиям  $e_i \in E$  просуммировать произведения  $\mu_A(e_i)P(e_i)$ , т. е.

$$P(A) = \sum_i \mu_A(e_i)P(e_i).$$

Эта запись есть математическое ожидание дискретной случайной величины  $\mu_A$ .

Таким образом, вероятность наступления нечёткого случайного события есть математическое ожидание функции принадлежности этого нечеткого события, т. е.

$$P(A) = M[\mu_A]. \quad (4.16)$$

Если целью операции является достижение результата  $y(u)$  не ниже требуемого уровня при нечётком задании последнего, то функцию соответствия можно ввести по аналогии с (4.6):

$$\rho[\hat{y}(u), \tilde{y}^{mp}] = \begin{cases} 1, & \text{если } \hat{y}(u) \geq \tilde{y}^{mp}; \\ 0, & \text{если } \hat{y}(u) < \tilde{y}^{mp}; \end{cases} \quad (4.17)$$

и тогда

$$M\{\rho[\hat{y}(u), \tilde{y}^{mp}]\} = P[\hat{y}(u) \geq \tilde{y}^{mp}] = M[\mu(y^{mp})]$$

или в общем виде

$$P[\hat{y}(u) \geq \tilde{y}^{mp}] = \int_E \mu_A(y) dF(y),$$

где  $E$  – область изменения случайных факторов.

Однако в качестве функции соответствия в этих условиях может быть использована и сама функция принадлежности, т. е.

$$\rho[\hat{y}(u), \tilde{y}^{mp}] = \mu_A(y^{mp}). \quad (4.18)$$

Она в определенном смысле эквивалентна (4.8).

#### 4.2.7. Показатель рассеяния результатов

Иногда в качестве показателя эффективности в условиях, когда результат описывается случайной величиной, приходится использовать характеристику рассеяния (кучности) реального результата относительно требуемого значения или относительно своего математического ожидания. Функции соответствия в этом случае имеют вид

$$\rho(y, y^{mp}) = [\hat{y}(u) - y^{mp}]^2; \quad (4.19)$$

$$\rho(y, y^{mp}) = \{\hat{y}(u) - M[y(\hat{u})]\}^2. \quad (4.20)$$

Иллюстрация для этих функций соответствия показателей рассеивания результатов приведена на рис. 4.6.

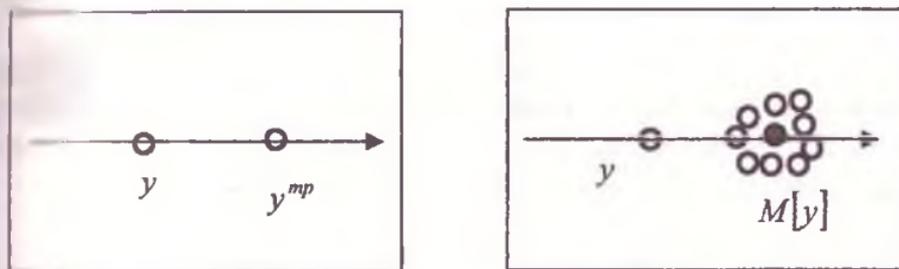


Рис. 4.6. Иллюстрация для функций соответствия показателей рассеивания результатов

В первом случае показатель эффективности есть математическое ожидание квадрата отклонения реального результата от требуемого:

$$W(u) = M[\rho(y, y^{mp})] = M[\hat{y}(u) - y^{mp}]^2, \quad (4.21)$$

и во втором случае — дисперсия реального результата:

$$W(u) = M\{\hat{y}(u) - M[\hat{y}(u)]\}^2 = D^2[\hat{y}(u)]. \quad (4.22)$$

В практике исследований эффективности технических систем показатели (4.21) и (4.22) обычно используют как вспомогательные.

**Пример.** Рассмотрим функцию живучести КА при воздействии метеорных и техногенных частиц (МТЧ). Эта функция показывает вероятность сохранения работоспособного состояния (а функция отказа - вероятность его отказа) КА в зависимости от функциональной структуры бортовых систем, функций живучести элементов, от уровня критериальных параметров и направления воздействия МТЧ, а также от времени, прошедшего с момента воздействия МТЧ, то есть

$$R_G(t) = R_G\{R^{BC}[R_{zn}(t)], \omega, \varphi\},$$

где  $R^{BC}[R_{zn}(t)]$  - вектор функций живучести бортовых систем;

$R_{zn}(t)$  - вектор функций живучести элементов бортовых систем;

$\omega$  - вектор критериальных параметров факторов МТЧ;

$\varphi$  - вектор направления воздействия факторов МТЧ;

$t$  - параметр времени.

Графически эту функцию живучести можно изобразить в трехмерной системе координат в виде пространственной фигуры, напо-

Другим показателем эффективности (живучести) может служить дисперсия показателя живучести КА по различным направлениям воздействия факторов МТЧ:

$$W_1(t) = D^2[R_G(t)] = \iint_{\omega, \phi} \left( R_G \{ R^{SC}[R_u(t)], \omega, \phi \} - M[R_G(t)] \right)^2 f(\omega, \phi) d\omega d\phi.$$

Этот показатель характеризует степень отклонения показателей живучести КА от так называемой «равноживучести» КА по всем направлениям воздействия факторов МТЧ.

#### 4.2.8. Показатели среднего риска

В качестве показателя эффективности операции, связанной, например, с распознаванием некоторых ситуаций, образов, объектов и т. п., теория статистических решений рекомендует выбирать средние потери (средний риск), которые появляются при неправильном (ошибочном) распознавании.

В этих задачах в качестве функции соответствия принимаются потери  $\Pi_{ij}$  (функция потерь), связанные с тем, что объект, принадлежащий множеству  $H_i$ , был ошибочно (при  $i \neq j$ ) отнесен к множеству  $H_j$ . Здесь, следовательно, функция соответствия имеет вид

$$\rho[y(u), y^{mp}] = \Pi_{ij}.$$

Пусть  $P(H_i)$  — вероятность того, что объект принадлежит множеству  $H_i$ ,  $P_u(H_j|H_i)$  — условная вероятность отнесения объекта из множества  $H_i$  к множеству  $H_j$  (вероятность ошибки при  $i \neq j$ ).

Показатель эффективности операции по распознаванию объекта записывается в виде средних потерь (байесовский средний риск):

$$W(u) = M[\rho] = \sum_i \sum_j \Pi_{ij} P(H_i) P_u(H_j|H_i). \quad (4.23)$$

И в этом случае показатель эффективности имеет форму (4.2), т. е. является математическим ожиданием функции соответствия  $\rho = \Pi_{ij}$ .

Индекс « $u$ » в записи условной вероятности  $P_u(H_j|H_i)$  показывает, что она зависит от стратегии распознавания  $u \in U$ .

Рассмотренные формы функции соответствия и показателя эффективности приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2. Формы функций соответствия и показателей эффективности

| Требуемые результаты $y^{\text{тр}}$                                                | Функция соответствия $p(y(u), y^{\text{тр}})$                                                                       | Показатель адекватности $W(u) = M\{p(y(u), y^{\text{тр}})\}$ | Название показателя эффективности                           | Примечание |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------|
| Случайное событие $A$                                                               | $p = \begin{cases} 1, & \text{если наступило } A \\ 0, & \text{если не наступило } A \end{cases}$                   | $P_u(A)$                                                     | Вероятность случайного события                              | —          |
| Задан параметром $y^{\text{тр}}$                                                    | $p = \begin{cases} 1, & \text{если } y(u) \geq y^{\text{тр}} \\ 0, & \text{если } y(u) < y^{\text{тр}} \end{cases}$ | $P(y(u) \geq y^{\text{тр}}) = 1 - F(y^{\text{тр}})$          | Степень вероятностной гарантии достижения требуемого уровня | —          |
|                                                                                     |                                                                                                                     | $P(y(u) \geq \theta_H) = \int F_H(y) dF(y)$                  |                                                             |            |
| $y^{\text{тр}}$ — нечеткая переменная с функцией принадлежности $\mu$               |                                                                                                                     |                                                              |                                                             |            |
| $y^{\text{тр}}$ — случайная переменная $\theta_H$ с функцией распределения $F_H(y)$ |                                                                                                                     |                                                              |                                                             |            |

| Требующий результат $y^*$                   | Функция соответствия $\rho(y(u), y^*)$ | Показатель эффективности $\Psi(u) = M[\rho(y(u), y^*)]$ | Название показателя эффективности                   | Примечание                                              |
|---------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Не определен (или $y^* = \max(\min) y(u)$ ) | $\rho = y(u)$                          | $M[y(u)]$                                               | Средний результат                                   | Если $y(u)$ неслучайная переменная, то $\Psi(u) = y(u)$ |
| Задан параметром $y^*$                      | $\rho = (y(u) - y^*)^2$                | $M[(y(u) - y^*)^2]$                                     | Средний квадрат отклонения результата от требуемого | —                                                       |
| Не определен                                | $\rho = (\theta(u) - M[y(u)])^2$       | $D[y(u)]$                                               | Дисперсия результата                                | Результат $y(u)$ — случайная величина                   |
| Задана степень гарантии $\alpha$            | $\rho = F^{-1}(1 - \alpha) = y_\alpha$ | $y_\alpha$                                              | Вероятностно-гарантированный результат              | —                                                       |
| Не определен                                | $\rho = \Pi_{ij}$                      | $\sum_i \sum_j \Pi_{ij} P(H_j) P(H_i/H_j)$              | Средний (байесовский) риск (средние потери)         | $\Pi_{ij}$ — функция потерь                             |

#### 4.2.9. Показатель эффективности для конфликтных ситуаций

Рассмотрим один из способов введения показателя эффективности для случая конфликтных ситуаций при наличии неопределенности в поведении оппонента.

Пусть имеет место конфликтная ситуация и на результат операции влияет не только выбор стратегии  $u \in U$  лицом, принимающим решение, но и выбор стратегии  $v$  оппонентом из известного множества его допустимых стратегий  $V$ .

Таким образом, результат операции  $y(u, v)$  зависит от  $u \in U$  и  $v \in V$ . Функция соответствия, как и в предыдущих примерах, будет измерять степень соответствия реального результата операции требуемому:

$$\rho = \rho[y(u, v), y^{mp}].$$

При наличии случайных факторов введем математическое ожидание функции соответствия (условный показатель эффективности)

$$W(u, v) = M\{\rho[y(u, v), y^{mp}]\} \quad (4.24)$$

и выдвинем гипотезу поведения оппонента: он выбирает свои стратегии  $v \in V$  так, чтобы при любой стратегии ЛПР  $u \in U$  минимизировать степень соответствия реального результата операции желаемому для ЛПР (т. е. интересы оппонента противоположны интересам ЛПР). В этих условиях в качестве показателя эффективности для ЛПР можно выбрать минимальное значение  $W(u, v)$  для каждой стратегии  $u \in U$ , т. е.

$$W(u, v) = \min_{v \in V} M\{\rho[y(u, v), y^{mp}]\}. \quad (4.25)$$

Эта форма показателя эффективности операции уже отличается несколько от (4.2). Однако функция соответствия  $\rho[y(u, v), y^{mp}]$  в выражении (4.25) может принимать любой вид из тех, которые были рассмотрены в предыдущих примерах. Например, функция соответствия может выражать:

- вероятность случайного события;
- средний результат;
- вероятностную гарантию получения требуемого результата;
- вероятностно-гарантированный результат;

- вероятностную гарантию того, что реальный результат будет не менее требуемого при случайном характере как реального, так и требуемого результатов;

- среднюю меру превышения случайной величины полученного результата над неопределённой величиной требуемого результата;

- рассеивание результатов;

- средний риск и др.

То есть показатель эффективности для конфликтных ситуаций включает в себя частные показатели, рассмотренные в предыдущих пунктах данного подраздела.

При любой стратегии оппонента и фиксированной стратегии ЛПП  $W(u) \leq W(u, v)$ , т. е.  $W(u)$  является нижней границей среднего значения функции соответствия реального результата операции требуемому (для ЛПП).

### 4.3. Показатели эффективности космической системы наблюдения

На рис. 4.8 приведена схема декомпозиции некоторых показателей качества и эффективности типовой космической системы детального глобального наблюдения с оперативной фактбанкой информации потребителю. Их принято подразделять на следующие показатели: обобщенные, основные и частные.

Для космической системы наблюдения в целом в качестве обобщенного показателя эффективности, как правило, рассматривается показатель экономической эффективности  $\mathcal{E}$ .

Этот показатель подсчитывается как разница между доходом от эксплуатации КСН и затратами, включающими затраты на разработку, изготовление и установку составных частей, выведение в А на рабочие орбиты и эксплуатацию составных частей КСН:

$$\mathcal{E} = D_{КСН} - C_{\Sigma} \quad (4.27)$$

К основным показателям эффективности, прежде всего, относятся показатели, связанные со стоимостью создания и эксплуатации космической системы наблюдения.

В качестве одного из основных показателей эффективности космической системы наблюдения может служить стоимость создания и эксплуатации космической системы наблюдения  $C_{\Sigma}$ .

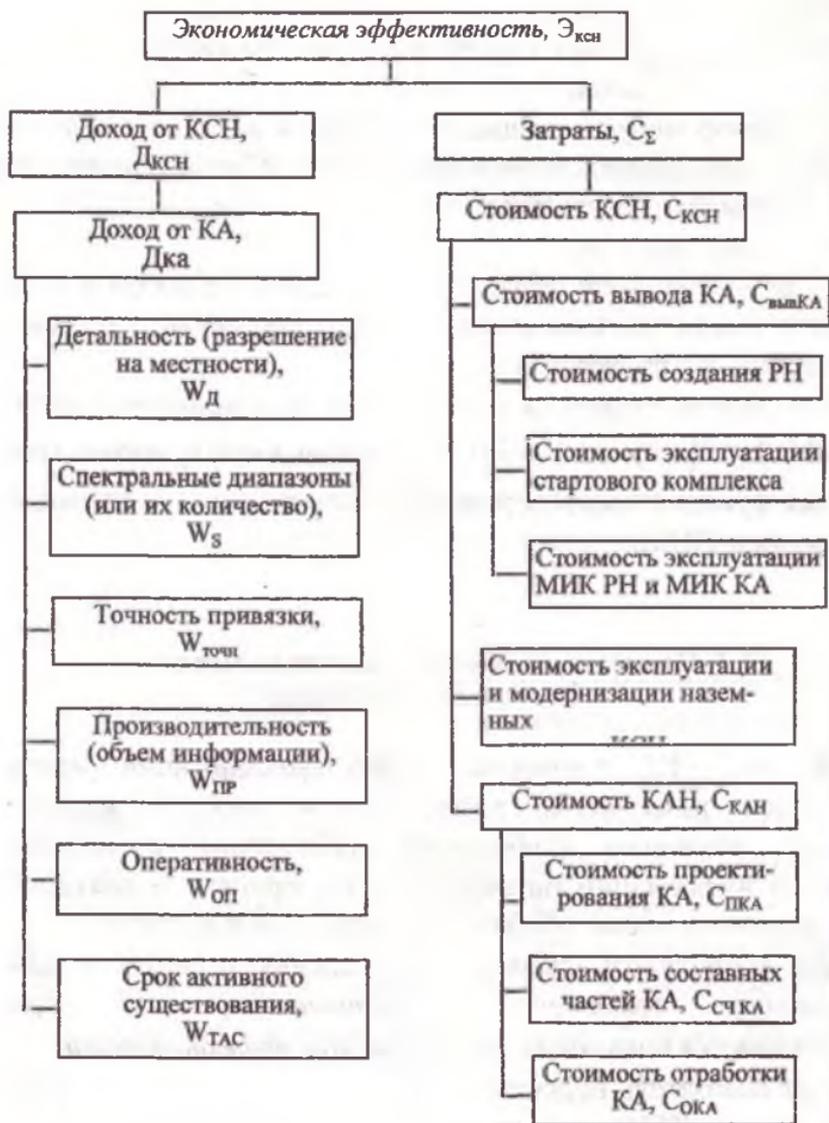


Рис. 4.8. Дерево показателей эффективности космической системы наблюдения

Если разрабатывается *космический аппарат* (как элемент космической системы наблюдения), то в качестве основных показателей эффективности могут быть приняты стоимости (разработки и производства КА)  $C_{КА}$ , стоимости его вывода на орбиту  $C_{ВысКА}$  и др.

В качестве основных показателей эффективности могут быть приняты также стоимость (разработки и производства КА)  $C_{КА}$ , стоимость его вывода на орбиту  $C_{Выв\ КА}$  и т.п.

К основным показателям эффективности также относятся показатели, связанные с доходом от эксплуатации космической системы наблюдения  $D_{КСН}$ .

Доход от эксплуатации КСН получается вследствие реализации снимков основному заказчику или на мировом рынке (для разработки геодезических карт, создания земельных кадастров и др.). Этот доход будет тем больше, чем лучше качество снимков, которое включает в себя следующие основные показатели качества:

- детальность (разрешение на местности)  $W_{Дет}$ ;
- спектральные диапазоны  $W_S$  (или их количество);
- точность привязки снимка к геодезическим координатам  $W_{Точн}$ ;
- производительность (объем получаемой информации в единицу времени)  $W_{Пр}$ ;
- оперативность доставки информации потребителю  $W_{Он}$ ;
- срок активного существования КА наблюдения  $W_{ТАС}$  и др.

Частные показатели обычно связаны с техническими характеристиками. К таким показателям можно отнести, например, массу КА  $m_{КА}$ , моменты инерции КА, относительные массы бортовых систем и конструкции КА  $\xi_{КС}$ , среднесуточный угол  $\alpha$  между направлением на Солнце и нормалью к поверхности панели СБ (или его косинус) и др.

### Контрольные вопросы

1. Назовите основные требования к показателям эффективности и мерам выражения результата.

2. Какие формы показателей эффективности Вы знаете? Приведите примеры векторных показателей эффективности.

3. Приведите определение следующих показателей эффективности:

- вероятности случайного события;
- вероятности среднего результата;
- вероятностную гарантию получения требуемого результата;
- вероятностно-гарантированный результат;

- вероятностную гарантию того, что реальный результат будет не менее требуемого при случайном характере как реального, так и требуемого результатов;

- среднюю меру превышения случайной величины полученного результата над неопределённой величиной требуемого результата;

- меру рассеивания результатов;

- меру среднего риска и др.

4. Охарактеризуйте показатели эффективности космической системы наблюдения.

## 5. КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Критерий эффективности  $K$  есть правило, позволяющее сопоставлять стратегии, характеризующиеся различной степенью достижения цели, и осуществлять направленный выбор стратегий из множества допустимых.

Классификация критериев эффективности приведена на рис. 5.1.



Рис. 5.1. Классификация критериев эффективности

При выборе критерия эффективности операции всегда следует придерживаться важнейшего положения: согласования цели операции и критерия эффективности.

### 5.1. Концепции рационального поведения

Критерий эффективности вводится на основе определенной концепции рационального поведения.

Существуют три концепции рационального поведения системы (выработки решений):

пригодности, оптимизации, адаптивизации.

### 5.1.1. Концепция пригодности

Согласно концепции пригодности рациональна любая стратегия  $u$ , при которой выбранный показатель эффективности принимает значение не ниже некоторого приемлемого уровня  $W^{mp}$ , т. е.

$$W(u) \geq W^{mp}, \quad u \in U, \quad (5.1)$$

где  $U$  – множество допустимых стратегий.

Если показатель эффективности векторный, то неравенство (5.1) записывается для каждого частного показателя  $W_i(u) \geq W_i^{mp}$ , входящего в состав векторного показателя эффективности. Таким образом уровень удовлетворения  $W^{mp}$  делит множество допустимых стратегий  $U$  на два непересекающихся подмножества:  $U^{SAT}$ <sup>1</sup> – множество приемлемых (пригодных) стратегий и множество неприемлемых стратегий  $U \setminus U^{SAT}$ . Все приемлемые стратегии  $u \in U^{SAT}$  равноценны (одинаково удовлетворительны), как и все неприемлемые стратегии из множества  $U \setminus U^{SAT}$  одинаково неудовлетворительны. Подобная концепция приводит к негибкой и нецелеустремленной системе действий.

### 5.1.2. Концепция оптимизации

Концепция оптимизации считает рациональными те стратегии  $u \in U$ , которые обеспечивают максимальный эффект в операции, т. е.

$$W(u^*) = \max_{u \in U} W(u). \quad (5.2)$$

Оптимальная стратегия может быть неединственной, т. е. решение задачи (5.2) может дать множество равноценных оптимальных стратегий  $U^* \in U$ .

<sup>1</sup> SAT – от англ. Sit - сидеть, быть расположенным, иметь правильную позицию

Использовать концепцию оптимизации можно в том случае, если комплекс условий проведения операции строго фиксирован, а показатель эффективности  $W(u)$  — скаляр. Эта концепция приводит к неустремленной, но не гибкой системе действий, так как не учитывается текущая информация об изменениях различного рода, происходящих в системе и во внешней среде при реализации решения  $u$ .

### 5.1.3. Концепция адаптивизации

Если операция проводится в условиях существенной *неопределенности* (целевой, природной и поведенческой), то в качестве критериев лучше использовать подход к формированию критериев, основанный на концепции адаптивизации.

Концепция адаптивизации предполагает возможность оперативного реагирования в ходе операции на поступающую текущую информацию об изменении комплекса условий проведения операции.

Этот подход предполагает прогнозирование возможных условий  $\Lambda$  и способов  $U$  на основе не только априорной (статической) информации, но также текущей динамической и прогнозной (виртуальной) информации.

#### Примеры:

- управление ракетой-носителем для обеспечения заданной программы изменения угла тангажа;
- автоматическая фокусировка оптико-электронного телескопического комплекса космического аппарата наблюдения;
- подстройка пространственного положения шестиугольных элементов большого зеркала радиантенны дальней космической связи.

Суть концепции адаптивизации заключается в изменении стратегий управления  $u$  (стратегия понимается в более широком смысле и включает как способы изменения параметров системы, так и способы изменения ее структуры) на основе не только априорной, но и текущей и прогнозной информации с целью достижения или сохранения определенного состояния системы при изменяющемся комплексе условий проведения операции.

Множество допустимых стратегий  $U$  может видоизменяться в процессе поступления текущей информации. В качестве реакции на поступающую информацию и прогноза развития операции система может изменять цель своего функционирования.

В этом случае согласно концепции адаптивизации рационально следует считать такую адаптивную стратегию  $u(t)$  из множества  $U(t, \tau)$ , которая обеспечивает, например, выполнение условия

$$W_i[u^*(t), \tau] \geq W_i^{mp}[u(t), \tau], \quad u(t) \in U(t, \tau), \quad (5.3)$$

где  $t$  – время;  $\tau$  – упреждение прогноза.

Запись  $W_i$  означает, что показатель эффективности может меняться во времени.

Концепция адаптивизации приводит к целеустремленной и гибкой системе действий.

Следовательно, суть этого подхода состоит не просто в выборе лучшего, как это имеет место в концепции оптимальности, а именно *в движении к лучшему*.

## 5.2. Критерии в рамках концепции пригодности

В рамках концепции пригодности рекомендуется выбор стратегии из условия (5.1). Приведем основные критерии пригодности.

### 5.2.1. Критерий приемлемого результата

В условиях определенности в качестве показателя эффективности может быть выбран результат операции  $y(u)$ , цель которой носит количественный характер. В этом случае  $\rho[y(u), y^{mp}] = y(u)$ . Критерий приемлемого результата рекомендует выбирать стратегии  $u$  из множества допустимых, удовлетворяющую условию:

$$u^* : y(u) \geq y^{mp}, \quad (5.4)$$

где  $y^{mp}$  – приемлемый уровень результата.

### 5.2.2. Критерий допустимой гарантии

Согласно этому критерию функцию соответствия выбирают:

$$\rho[y(u), y^{mp}] = \begin{cases} 1, & \text{если } y \geq y^{mp}; \\ 0 & \text{если } y < y^{mp}; \end{cases}$$

- в виде (4.14) при случайном характере требуемого результата.

- в виде (4.17) при нечётком определении последнего.

Принцип допустимой гарантии рекомендует выбирать стратегии из условия

$$u^* : P[y(u) \geq y^{mp}] \geq P^{mp}, \quad (5.5)$$

где  $P^{mp}$  – приемлемый уровень вероятностной гарантии.

### 5.2.3. Критерий допустимого гарантированного результата

Согласно этому критерию функция соответствия имеет вид

$$\rho = F_u^{-1}(1 - \gamma) = y_\gamma(u).$$

Пригодную стратегию выбирают из условия

$$u^* : y_\gamma(u) \geq y^{mp}, \quad (5.6)$$

где  $y^{mp}$  – допустимый уровень гарантированного результата с вероятностью  $\gamma$ .

## 5.3. Критерии в рамках концепции оптимизации

В зависимости от вида функции соответствия в рамках концепции оптимизации выделяют следующие критерии оптимальности.

### 5.3.1. Критерий наибольшего результата

По аналогии с принципом приемлемого результата здесь  $\rho[y(u), y^{mp}] = y(u)$ . Оптимальную стратегию выбирают из условия (5.7), т. е.

$$u^* : \max_{u \in U} y(u). \quad (5.7)$$

### 5.3.2. Критерий наибольшего среднего результата

При существенном влиянии случайных факторов часто сам результат  $y(u)$  выбирают в качестве функции соответствия. Тогда показатель эффективности есть математическое ожидание результата (средний результат), т. е.

$$W(u) = M[\hat{y}(u)]. \quad (5.8)$$

Критерий наибольшего среднего результата рекомендует выбрать в качестве оптимальной стратегию  $u^*$ , для которой

$$u^* : \max_{u \in U} M[\hat{y}(u)]. \quad (5.9)$$

Критерий наибольшего среднего результата в практике исследования операций получил наибольшее распространение. Это обусловлено аддитивностью показателя среднего результата (4.6), что в значительной мере в некоторых случаях облегчает его расчет.

Однако показатель среднего результата (4.5), лежащий в основе этого критерия, не учитывает в явном виде требуемый результат. Кроме того, ориентация на средний результат оправдана при массовом повторении операции. При однократном проведении операции (уникальные операции, системы) нецелесообразно использовать критерий наибольшего среднего результата.

### 5.3.3. Критерий наибольшей вероятностной гарантии результата

Если результат операции выражается случайной переменной  $\hat{y}(u)$  и чётко определен требуемый результат  $y^{mp}$ , то функцию соответствия вводят в следующем виде:

$$\rho[y(u), y^{mp}] = \begin{cases} 1, & \text{если } y \geq y^{mp}; \\ 0 & \text{если } y < y^{mp}. \end{cases} \quad (5.10)$$

Показатель эффективности в форме (4.2) в этом случае есть вероятность того, что реальный результат операции примет значение не ниже требуемого уровня, т. е.

$$W(u) = P[\hat{y}(u) \geq y^{mp}]. \quad (5.11)$$

Критерий наибольшей вероятностной гарантии рекомендует в качестве оптимальной выбирать стратегию  $u^* \in U$  из условия

$$u^* : \max_{u \in U} P[\hat{y}(u) \geq y^{mp}]. \quad (5.12)$$

Это условие сохраняется при нечётком определении  $y^{mp}$  с помощью функции принадлежности  $\mu_A(y^{mp})$ . В этом случае функцию соответствия следует отождествить с функцией принадлежности, т. е.

$$\rho[y(u), y^{mp}] = \mu_A(y^{mp}). \quad (5.13)$$

Условие (5.12) примет вид

$$u^* : \max_{u \in U} P[\hat{y}(u) \geq y^{mp}].$$

При случайном характере  $y^{mp}$  условие (5.12) сохраняется в следующем виде:

$$u^* : \max_{u \in U} P[\hat{y}(u) \geq \hat{y}^{mp}]. \quad (5.14)$$

В случаях, когда определен требуемый результат операции, критерий наибольшей вероятностной гарантии лучше согласован с целью операции, чем критерий наибольшего среднего результата. Последний не учитывает дисперсии, характеризующей рассеяние реального результата операции.

На рис. 5.2 изображены функции распределения реального результата операции  $F_{u_1}(y)$  и  $F_{u_2}(y)$  при использовании стратегий  $u_1$  и  $u_2$ .

Предположим, что математические ожидания результатов для стратегий  $u_1$  и  $u_2$  одинаковы, т. е.  $M[y(u_1)] = M[y(u_2)]$ . При фиксированном значении требуемого результата, как видно из рисунка,  $P_{u_1}(y \geq y^{mp}) < P_{u_2}(y \geq y^{mp})$ . Следовательно, предпочтение следует отдать стратегии  $u_2$ . Однако, если значение требуемого результата выбрать достаточно большим ( $y_1^{mp}$ ), то преимуществом будет обладать стратегия  $u_1$ ; но при этом уровень вероятностной гарантии неприемлемо низок.

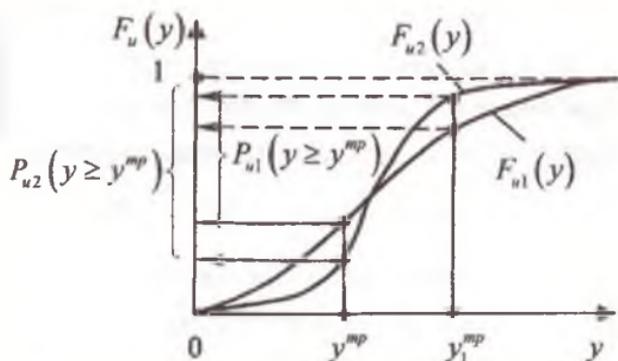


Рис. 5.2. Функции распределения реального результата операции при использовании стратегий  $u_1$  и  $u_2$

Таким образом, решения, принимаемые на основе критерия наибольшей вероятностной гарантии, могут существенно зависеть от уровня требуемого результата.

#### 5.3.4. Критерий наибольшего гарантированного результата

При случайном характере результата  $\hat{y}(u)$  операции гарантированным результатом (вероятностно-гарантированным результатом) называют уровень  $y_\gamma(u)$ , не ниже которого будет получен реальный результат с заданной вероятностью  $\gamma$ , т. е.

$$u^* : P[\hat{y}(u) \geq y_\gamma(u)]. \quad (5.15)$$

Отсюда  $y_\gamma(u) = F_u^{-1}(1 - \gamma)$  и функция соответствия есть  $\rho = y_\gamma(u)$ .

Следовательно, показатель эффективности в силу того, что  $y_\gamma(u)$  не является случайной переменной (4.17), принимает вид

$$W(u) = y_\gamma(u). \quad (5.16)$$

Согласно критерию наибольшего гарантированного (вероятностно-гарантированного) результата оптимальную стратегию выбирают из условия

$$u^* : \max_{u \in U} y_\gamma(u) \quad (5.17)$$

при фиксированной вероятности  $\gamma$ .

Аналогичный вывод можно сделать в отношении критерия наибольшего гарантированного результата, при котором решения зависят от уровня гарантии  $\gamma$ .

На рис. 5.3 показана схема выбора стратегии по критерию наибольшего гарантированного результата для случая, когда из двух допустимых стратегий  $u_1$  и  $u_2$  при уровне вероятностной гарантии  $\gamma$  предпочтение отдается стратегии  $u_2 : [y_\gamma(u_1) < y_\gamma(u_2)]$ .

Однако при уровне гарантии  $\alpha$  следует выбрать стратегию  $u_1$ , так как  $y_\alpha(u_2) < y_\alpha(u_1)$ , но этот уровень гарантии, как показано на рисунке, неприемлемо мал (как правило, соответствует уровню значимости  $\alpha = 1 - \gamma$ ).

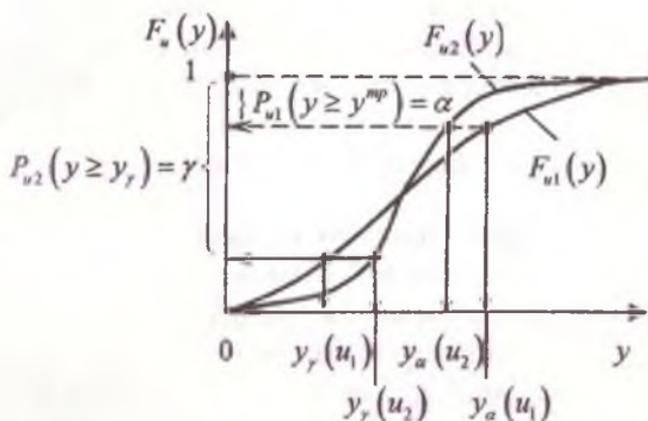


Рис. 5.3. Схема выбора стратегии по критерию наибольшего гарантированного результата

Таким образом, критерий наибольшей вероятностной гарантии следует использовать при не слишком больших значениях требуемого результата  $y^{mp}$  (обычно меньших среднего результата, т. е.  $y^{mp} < M[y(u)]$ ).

Критерий наибольшего гарантированного результата используют при достаточно высоком уровне степени гарантии ( $\gamma > 0,6...0,7$ ).

### 5.3.5. Критерий эффективности в условиях конфликта

Пусть в условиях конфликта показатель эффективности  $W(u)$  имеет вид (4.25):  $W(u, v) = \min_{v \in V} M\{\rho[y(u, v), y^{mp}]\}$ .

Критерий наибольшего гарантированного результата в этом случае в качестве оптимальной рекомендует выбирать стратегию  $u^*$  из условия

$$u^* : \max_{u \in U} \min_{v \in V} M\{\rho[y(u, v), y^{mp}]\}. \quad (5.18)$$

Это условие отражает принцип максимина. При этом стратегию  $u^*$  называют максиминной.

## 5.4. Критерии в рамках концепции адаптивизации

В рамках концепции адаптивизации рациональное поведение сложной системы организуется в соответствии со следующими основными принципами выбора критериев эффективности.

### 5.4.1. Принцип селекции

На каждом шаге многоэтапного процесса принятия решения этот принцип предусматривает отбор (селекция) нескольких решений, близких к лучшим. Затем из этих решений следует сформировать ряд комбинаций и на следующем этапе принятия решений отобрать несколько комбинаций, близких к лучшим, пользуясь критерием более высокого порядка, чем на предыдущем шаге. Таким образом, формируется ряд усложняющихся комбинаций решений, из которого отбираются не только самые лучшие решения, но и близкие к ним.

### 5.4.2. Принцип свободы выбора решений

Этот принцип может быть реализован при организации поведения систем, способных к самоорганизации (обладающих  $L$  — качеством). Он рекомендует не принимать на основе априорной информации решения во всех деталях на всю обозримую перспективу (иногда его называют принципом неокончательных решений). Свобода выбора здесь заключается в возможности пересмотра, уточнения ранее принятого решения в зависимости от текущей информации.

**Пример.** Во время одного из пусков РН «Протон» в 2012 г. двигатель разгонного блока развивал меньшую тягу, чем планировалось. По истечении заданного времени система управления отключила двигатель (не было свободы выбора), хотя топливо оставалось. В результате полезная нагрузка не была выведена на расчётную орбиту.

### 5.4.3. Принцип самообучения

Согласно этому принципу адаптивное поведение системы обеспечивается в процессе многократных внешних воздействий на систему, запоминанием реакций на эти воздействия и результатов реагирования, а также корректировкой реакций, направленной на повышение эффективности поведения системы. Накапливаемая ин-

формация в процессе самообучения используется для усовершенствования критерия эффективности.

#### 4.4. Математическая формулировка критерия адаптивности

Математической формулировкой критерия адаптивности при выборе решений может, например, служить следующее выражение:

$$u^*(t, \tau): \sup_{u(t) \in U(t, \tau)} W'(u, t, \tau), \quad (5.19)$$

где  $u$ ,  $U$  имеют тот же смысл, что и ранее (множество стратегий управления);

$t$  – время;

$\tau$  – упреждение прогноза;

$\sup$  – точная верхняя граница множества.

Запись  $W'$  означает, что цели операции, следовательно, показатели и критерии, могут меняться во времени. Сам же показатель формируется как некоторое осреднение по факторам  $\lambda \in \Lambda_j$ .

Использование критерия (5.19) позволяет выбирать «нехудшую» стратегию  $u^*(t, \tau)$  с точностью до ошибок прогнозирования на период прогноза  $\tau$ . Эта стратегия обеспечивает наибольшее значение функции  $W'$  на рефлексивно выбранном множестве допустимых стратегий  $U(t, \tau)$ , которое формируется к данному моменту времени  $t$ .

Таким образом, принцип принятия решений на основе концепции адаптивизации оказывается наиболее сложным по уровню выработки управляющих воздействий, но в то же время и наиболее совершенным.

## 5.5. Критерии эффективности космической системы наблюдения

### 5.5.1. Иерархическая структура критериев синтеза космической системы наблюдения

Для космических систем и аппаратов наблюдения существуют свои критерии для каждого уровня иерархии рассматриваемой системы. На рис. 5.4 показано дерево целей синтеза космической системы наблюдения, представленное в виде иерархической

структуры критериев. Это дерево построено на основе дерева показателей эффективности (см. рис. 4.8).

Критерии синтеза (как и показатели эффективности) принято подразделять на обобщенные, основные и частные критерии.

### 5.5.2. Обобщенные критерии эффективности

Если разрабатывается космическая система наблюдения в целом, то в качестве *обобщенного* критерия эффективности КСН, как правило, принимается максимум экономической эффективности, то есть

$$\mathcal{E} \rightarrow \max, \quad (5.20)$$

при ограничениях на затраты финансовых средств, ресурсов и времени при создании космической системы наблюдения, а также при наличии других ограничений.

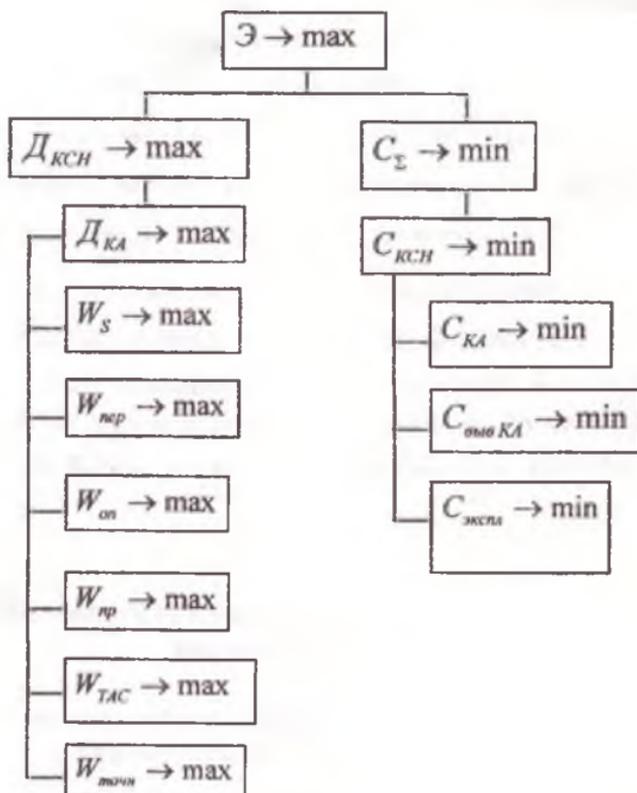


Рис. 5.4. Дерево критериев синтеза космической системы наблюдения

### 5.5.3. Основные критерии эффективности

В качестве одного из основных критериев эффективности космической системы наблюдения может служить минимальная стоимость создания и эксплуатации КСН, то есть

$$C_{\Sigma} \rightarrow \min, \quad (5.21)$$

при ограничениях на материальные, трудовые и др. ресурсы, а также при ограничениях по времени создания КС наблюдения.

Если разрабатывается *космический аппарат* (как элемент КСН), то в качестве основных критериев эффективности могут быть приняты минимизация стоимости (разработки и производства КА)

$$C_{КА} \rightarrow \min$$

и стоимости его вывода на орбиту:

$$C_{\text{Выв КА}} \rightarrow \min, \quad (5.22)$$

и др. критерии.

В качестве ограничений могут выступать заданные показатели качества (если они заданы в ТТЗ), например, детальность и периодичность наблюдения, производительность съёмки и оперативность передачи видеоинформации на Землю и т.п.

В качестве основных критериев эффективности могут быть приняты также минимальная стоимость (разработки и производства КА), минимальная стоимость его вывода на орбиту и т.п.:

$$C_{КА} \rightarrow \min, \quad C_{\text{Выв КА}} \rightarrow \min, \quad (5.23)$$

при наличии ограничений по показателям качества (детальность, производительность, оперативность, стоимость и т.п.).

В качестве основного критерия эффективности космической системы наблюдения также могут служить показатели, связанные с доходом от ее эксплуатации:

$$D_{КСН} \rightarrow \max. \quad (5.24)$$

Доход от эксплуатации космической системы наблюдения получается вследствие реализации снимков основному заказчику или на мировом рынке (для разработки геодезических карт, создания земельных кадастров и др.). Этот доход будет тем больше, чем лучше качество снимков. Поэтому в качестве основных критериев эффективности космической системы наблюдения можно использовать следующие:

$$W_{\text{Дет}} \rightarrow \max, \quad W_S \rightarrow \max, \quad W_{\text{Точн}} \rightarrow \max, \quad W_{\text{Пр}} \rightarrow \max, \\ W_{\text{Он}} \rightarrow \max, \quad W_{\text{TAC}} \rightarrow \max, \quad (5.25)$$

при ограничениях по стоимости разработки, по срокам создания космической системы наблюдения, по материальным и трудовым ресурсам и т.п.

Данная задача относится к классу многокритериальных.

Решение задачи проектирования КСН заключается в перераспределении значений показателей эффективности и соответствующих ресурсов в соответствии с иерархической структурой дерева целей.

#### 5.5.4. Частные критерии эффективности

Проектирование КА по вышеприведенным критериям наталкивается на трудности, связанные с разработкой моделей стоимости в зависимости от проектных характеристик. В некоторых случаях составить функциональную связь между основными показателями эффективности и проектными характеристиками КА или КС трудно. Как же в этом случае производить отбор оптимальных значений проектных характеристик? Выход из этого положения находят за счет использования удачно подобранных частных критериев эффективности вместо основных. Подбор частных критериев, заменяющих основные критерии, возможен в тех случаях, когда известно, что с возрастанием (или убыванием) частного показателя эффективности также монотонно возрастает (или убывает) основной показатель эффективности. Например, с уменьшением массы космического аппарата, как правило, уменьшается его стоимость. Поэтому вместо критерия  $C_{КА} \rightarrow \min$ , где  $C_{КА}$  – стоимость КА, можно использовать критерий

$$m_{КА} \rightarrow \min, \quad (5.26)$$

где  $m_{КА}$  – масса КА.

С уменьшением массы и моментов инерции КА можно также повысить скорость поворота КА при отработке программы полёта (усовершенствовать динамические характеристики КА), что, в свою очередь, может привести к увеличению производительности  $W_{КА}$ .

Действительно, поскольку угловое ускорение  $\varepsilon_{КА}$  КА связано с управляющим моментом  $M_{УПР}$  и моментом инерции КА  $J_{КА}$  относительно какой-либо оси соотношением

$$\varepsilon_{КА} = \frac{M_{УПР}}{J_{КА}}, \quad (5.27)$$

то усовершенствование динамических характеристик КА возможно также за счет уменьшения моментов инерции КА. Следовательно, в качестве критерия выбора проектных решений кроме критерия (5.26) можно использовать критерий минимума момента инерции КА относительно какой-либо оси:

$$J_{КА} \rightarrow \min . \quad (5.28)$$

Уменьшение моментов инерции КА осуществляется за счёт грамотной компоновки (облика) КА, когда массивные составные части устанавливаются вблизи центра масс КА.

Относительные массы бортовых систем и конструкции КА также можно рассматривать в качестве частных критериев эффективности

$$\xi_{КС} \rightarrow \min , \quad (5.29)$$

так как очевидно, что с их уменьшением масса КА в целом и моменты инерции уменьшаются.

При проектировании КА ДЗЗ часто возникает проблема нехватки электрической мощности. Одним из способов повышения средне-суточной мощности системы электропитания без увеличения массы является установка панелей солнечных батарей (СБ) и планирование циклограммы работы КА таким образом, чтобы среднесуточный угол  $\alpha$  между направлением на Солнце и нормалью к поверхности панели СБ (или его косинус) был максимальным:

$$\overline{\cos \alpha} \rightarrow \max . \quad (5.30)$$

Существуют и другие частные критерии.

Введение частных критериев позволяет находить локальные экстремумы эффективности проектируемой системы с наименьшими затратами труда и времени.

## 5.6. Векторные критерии

В общем случае задача проектирования сложных технических систем относится к классу многокритериальных задач и решение, как правило, ищется на множестве Парето.

### 5.6.1. Многокритериальные задачи

Задачи такого рода рассмотрим в упрощенной постановке на следующем примере: пусть необходимо спроектировать КА наблю-

дения с максимальной разрешающей способностью на местности, максимальной производительностью съемки и максимальным сроком активного существования в условиях ограничения по массе.

Это так называемая техническая постановка задачи.

Напомним, что *разрешающая способность на местности* – это максимально различимая частота штрихов поля миры, которая связана с периодом поля миры  $\Delta L_M$  следующим соотношением:

$Rm = 1/\Delta L_M$ . Размерность этого показателя  $1/m$  [1]. Показатели производительности съемки  $Pr$  могут быть выражены в количестве объектов наблюдения, отснятых космическим аппаратом за виток, сутки полета, или в количестве отснятой площади (квадратных километрах) за те же периоды времени. Срок активного существования космического аппарата  $T_{AC}$  обычно выражается в годах.

Математическая постановка задачи запишется так:

$$Rm \rightarrow \max; \quad Pr \rightarrow \max; \quad T_{AC} \rightarrow \max \Big|_{\substack{X \in H \\ m_{KA} \leq m_{KA}^{don}}}$$

где  $m_{KA}$  и  $m_{KA}^{don}$  – масса и допустимая масса КА соответственно.

Запись  $X \in H$  означает принадлежность множества проектных параметров  $X$  некоторой допустимой области  $H$  (вертикальная черта условно означает «при условии»).

Графически проиллюстрировать многокритериальную задачу можно только для двух критериев. На рис. 5.5 показана иллюстрация для разрешающей способности на местности и производительности.

На этом рисунке введены следующие обозначения: 1 – граница множества проектных характеристик по целевой эффективности; 2 – множество реализуемых проектов (ниже линии ограничений); 3 – множество нереализуемых проектов (выше линии ограничений); 4 – множество (на линии) оптимальных проектных характеристик (множество Парето); 1' – граница множества характеристик массы; 2' – множество реализуемых характеристик массы (ниже линии ограничений по массе); 3' – множество нереализуемых характеристик массы (выше линии ограничений); 4' – линия ограничений по массе.

Для реализации показателей эффективности (качества) необходимы затраты массы. На рисунке каждое проектное решение по показателям качества (см. точки на левом графике) отображается на область затрат массы (см. точки на левом графике). Процесс отобра-

жения показан дугами со стрелками. Для отображения необходимо построить соответствующие модели. Иногда довольно сложные, например, алгоритмические или имитационные. Ограничимся простыми примерами.



Рис. 5.5. Иллюстрация постановки и решения двухкритериальной задачи математического программирования

Пусть в нашем примере ограничения по массе составят 6 тонн ( $m_{КА} \leq 6$ ). Из этой массы пусть 4 тонны необходимы для реализации бортовых обеспечивающих систем. Оставшиеся 2 тонны необходимо выделить на реализацию аппаратуры наблюдения (оптико-электронного телескопического комплекса), от которой зависит детальность, и реализацию системы ориентации (силовой гироскопический комплекс), от которой зависит производительность КА.

То есть сумма массы оптико-электронного телескопического комплекса  $m_{ОЭТК}$  и массы системы управления движением  $m_{СГК}$  должна быть меньше (или равна) двух тонн:  $m_{ОЭТК} + m_{СГК} \leq 2$ . Эту функцию ограничений по массе можно отобразить на область определения по показателям качества (см. на рисунке обратное отображение ограничений по массе на показатели целевой эффективности).

Если проектное решение лежит ниже границы области ограничений, то его можно улучшить по всем показателям (см. точку A со стрелками на левом графике и точку A' - на правом графике).

Если проектное решение лежит на границе области ограничений, то все варианты решения в поставленной задаче равнозначны (см. точки, выделенные темными кружочками на графиках). То есть

получилось множество равнозначных вариантов. Напомним, что такое множество еще называют множеством Парето. Это решение, при котором улучшение каких-либо частных показателей эффективности (или качества) сложной технической системы возможно только за счет ухудшения других частных показателей (одного или нескольких). Следует отметить, что решение на множестве Парето позволяет лишь сузить варианты выбора, а не выбрать конкретный вариант. Выбор конкретного варианта осуществляет так называемое *лицо, принимающее решение*.

### 5.6.2. «Свёртка критериев»

В частных случаях многокритериальные задачи выбора проектных решений удается свести к однокритериальным задачам, если выделять так называемый «главный критерий», а остальные критериальные показатели перевести в разряд качества (ограничений).

#### *Выделение «главного критерия»*

В вышерассмотренной задаче выбор может быть субъективным. Например, лицо, принимающее решение, может отдать предпочтение детальности в ущерб производительности. Практически это означает, что как бы был выбран так называемый «главный критерий» и задача свелась к однокритериальной задаче. Все остальные критерии перешли в разряд ограничений, то есть

$$Rm \rightarrow \max; \left\{ \begin{array}{l} x \in H \\ Pr \geq Pr^{don}; \\ T_{AC} \geq T_{AC}^{don}; \\ m_{KA} \leq m_{KA}^{don} \end{array} \right.$$

где верхним индексом *don* обозначены допустимые показатели эффективности (качества).

Следует отметить, что вместо многокритериальной задачи проектирования можно поставить столько однокритериальных задач, сколько критериев имеется в многокритериальной задаче, по очереди выбирая в качестве главного очередной критерий, а остальные показатели эффективности переводятся в разряд ограничений.

#### *Выбор комплексного критерия эффективности*

Многокритериальную задачу выбора проектных решений иногда удается свести к однокритериальной задаче, вводя некий

комплексный показатель эффективности, зависящий от частных показателей. В этом случае иногда говорят, что осуществляется так называемая свертка критериев. Свертка критериев может быть как объективной, основанной на физической (или экономической) связи между отдельными критериями, так и субъективной, основанной на шедении так называемых удельных весов каждого отдельного критерия. Комплексный показатель эффективности при субъективной свертке по возможности учитывает все рассматриваемые частные показатели эффективности, причем с учетом вклада (важности) каждого из частных показателей. Зависимость для расчета комплексного показателя эффективности, по сути дела, представляет собой средневзвешенную сумму  $n$  основных показателей эффективности:

$$W = \sum_{i=1}^n (k_i \cdot W_i). \quad (5.31)$$

В этом выражении  $W_i$  – частные показатели эффективности;

$k_i$  – удельный вес  $i$ -го частного показателя эффективности.

Комплексный критерий обычно записывается в виде

$$W \rightarrow \max.$$

Удельный вес частных показателей эффективности назначается экспертным методом. При этом должно соблюдаться одно из следующих соотношений:

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

если удельный вес частных критериев выражается в долях единицы;

$$\sum_{i=1}^n k_i = 100(\%),$$

если удельный вес частных критериев выражается в процентах.

Однако при использовании комплексного показателя эффективности необходимо, чтобы размерность сворачиваемых показателей была одинакова, или предварительно необходимо привести значения всех показателей эффективности к безразмерному виду. Это можно сделать, например, методом экспертного назначения так называемых приведенных показателей эффективности (оценки в баллах). При этом максимальные значения  $W_i$  должны быть одинаковыми для всех частных показателей, минимальные – тоже. Например, минимальное значение 0 – для

худшего варианта, максимальное значение 1 – для лучшего варианта (или 0 – для худшего варианта, максимальное значение 100 – для лучшего варианта).

Субъективность при свертке критериев проявляется в назначении удельных весов отдельных показателей эффективности и в приведении значений этих показателей к безразмерному виду.

### Контрольные вопросы

1. Поясните суть концепций рационального поведения:

- концепции пригодности;
- концепции оптимизации;
- концепции адаптивизации.

2. Приведите формальные записи критериев в рамках концепции пригодности:

- критерия приемлемого результата;
- критерия допустимой гарантии;
- критерия допустимого гарантированного результата.

3. Приведите формальные записи критериев в рамках концепции оптимизации:

- критерия наибольшего результата;
- критерия наибольшего среднего результата;
- критерия наибольшей вероятностной гарантии результата;
- критерия наибольшего гарантированного результата;
- критерия эффективности в условиях конфликта.

4. Расскажите о многокритериальных задачах (с примерами).

5. Приведите критерии эффективности космической системы и аппаратов наблюдения.

6. Расскажите о сведении многокритериальных задач к однокритериальным. В чём состоит суть выделения главного критерия? Преимущества и недостатки так называемой свёртки критериев.

## 6. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ В ТЕХНИКЕ

Практическое использование методологии системного анализа обусловлено целью и глубиной исследования, сложностью изучаемого объекта, степенью неопределенности его поведения и другими обстоятельствами. Системный подход к исследованию эффективно-технических систем реализуется в различных формах и проявлениях. Это связано с большим разнообразием систем по их составу, структуре, целевому назначению, способам использования, условиям функционирования, а также по принципам усложняющегося поведения.

### 6.1. Принципы усложняющегося поведения систем

Основой изучения сложных систем служат принципы усложняющегося поведения. Эти принципы позволяют установить существенные моменты, исходные положения, лежащие в основе поведения той или иной системы в зависимости от ее сложности.

В системологии (теории сложных систем) [18] установлен ряд принципов усложняющегося поведения систем.

На рис. 6.1 приведены принципы усложняющегося поведения систем в виде вложенных прямоугольников. Символически это значит, что если поставить точку внутри прямоугольника с надписью рефлексии, то эту точку будут содержать внутри себя все остальные прямоугольники (все принципы поведения реализуют системы, способные к рефлексивному управлению).

#### 6.1.1. Принцип вещественно-энергетического баланса

Поведение системы в любых условиях не приводит к нарушению законов сохранения вещества, энергии. Этот принцип лежит в основе поведения всех материальных систем — от простейших до предельно сложных. В практике исследования систем он важен при моделировании систем. Часто сама модель системы записывается как

уравнение, отражающее вещественно-энергетический баланс системы. Для простейших систем рассмотренный принцип является основным, определяющим их поведение. Эти системы назовем *e*-системами.

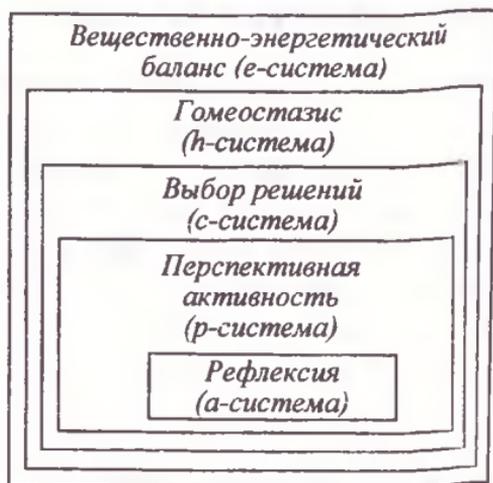


Рис. 6.1. Принципы усложняющегося поведения систем

Пример. Уравнения движения космических аппаратов на основе закона сохранения энергии (суммы потенциальной и кинетической) в центральном поле притяжения.

### 6.1.2. Принцип гомеостазиса

Система, реализующая в своем поведении этот принцип, должна иметь возможность возвращаться в состояние устойчивого равновесия, будучи выведенной из него внешним воздействием.

Подобное устойчивое гомеостатическое поведение системы обусловлено наличием в звене управления отрицательной обратной связи. Рассмотренный принцип является ведущим в поведении, например, систем регулирования (в том числе и автоматического).

Системы, реализующие в своем поведении в качестве основного принцип гомеостазиса, называют гомеостатическими, или *h*-системами. Управление в этих системах сводится к функции регулирования.

### **6.1.3. Принцип выбора решений**

Сложные системы способны организовывать свое поведение на основе рационального выбора альтернатив из некоторого неединичного их множества (на основе выбора решений). Ведущим этот принцип становится для систем, реализующих так называемое индуктивное поведение, т. е. поведение, основанное на непосредственном опыте, наблюдении ситуации и принятии решения в зависимости от сложившейся ситуации без предвидения дальнейшего развития событий.

Не обладая достаточным объемом памяти, такие системы не могут предвидеть будущие ситуации и, следовательно, не могут предпринимательно, заблаговременно принимать решения с учетом прогноза ситуаций.

Такие системы называют решающими (без предвидения), или *s*-системами. Теория статистических решений в основном рассматривает именно эти решающие системы.

### **6.1.4. Принцип перспективной активности**

Система может организовывать свое поведение, основываясь на предшествующем опыте в предположении, что будущие ситуации не могут существенно отличаться от прошлых.

Обладая достаточно емкой памятью и прогнозируя дальнейший ход развития ситуаций на основе ретроспективного анализа (т. е. анализируя развитие процесса в прошлом), система способна предвидеть будущее и планировать свое дальнейшее поведение (заблаговременно принимать решения, регламентирующие ее поведение в будущем).

Системы, для которых принцип перспективной активности является ведущим в организации их поведения, называют предвидящими, или *p*-системами.

### **6.1.5. Принцип рефлексии**

Система может организовывать свое поведение с учетом мысленного представления о действиях распорядителя другой системы, с которой первая находится в определенных отношениях.

Под рефлексией понимают отражение мыслительного процесса другого лица. Анализируя ход мысли, например конкурента (в усло-

виях конфликтной ситуации), ЛПР может продемонстрировать ему действия (быть может, ложные намерения), стимулирующие принять решение, выгодное для ЛПР. Если конкурент такое решение принимает, то это значит, что ЛПР осуществляет рефлексивное принуждающее управление конкурентом, навязывая ему свою волю путем передачи стимулов для принятия решений. В этом случае ЛПР находится в первом ранге рефлексии, а конкурент – в нулевом (он не анализирует мыслительный процесс лица, принимающего решения).

Однако и конкурент может находиться в первом ранге рефлексии (анализировать ход мысли ЛПР), и тогда рефлексивное управление затрудняется. Но ЛПР может подняться до второго ранга рефлексии (анализировать ход мысли конкурента о процессе мышления ЛПР). Оказавшись рангом рефлексии выше конкурента, ЛПР вновь становится способным рефлексивно управлять им.

Системы, организующие свое поведение на основе принципа рефлексии, должны быть наделены интеллектом (содержать в звене управления творчески мыслящих людей или системы с искусственным интеллектом). Эти системы относятся к классу весьма сложных. Такие системы называют пронизательными (рефлексивными), или  $\alpha$ -системами.

Принципы поведения указаны в порядке усложнения систем. Система, для которой определен принцип является ведущим, реализует в своем поведении все предшествующие принципы, но неспособна организовать свое поведение на основе последующих принципов. Так, например, предвидящие системы, реализуя первый, второй и третий принципы, а также принцип перспективной активности в качестве ведущего, не способны реализовать принцип рефлексии.

При анализе рационального поведения системы следует, прежде всего, установить ведущий принцип, положенный в основу поведения системы, т. е. установить тип системы. Затем необходимо выявить концепцию выработки решений, лежащую в основе организации рационального поведения системы, т. е. в основе управления системой.

## **6.2. Методологические уровни исследования эффективности технических и организационно-технических систем**

Опыт исследования эффективности технических систем показывает целесообразность введения четырех качественно различных ме-

топологических уровней анализа систем. На рис. 6.2 изображена схема методологических уровней анализа систем:

- I уровень – «состав-свойства» (элементарный уровень);
- II уровень – «структура-функции» (агрегативный уровень);
- III уровень – «организация-поведение» (системный уровень);
- IV уровень – «метасистема-деятельность».

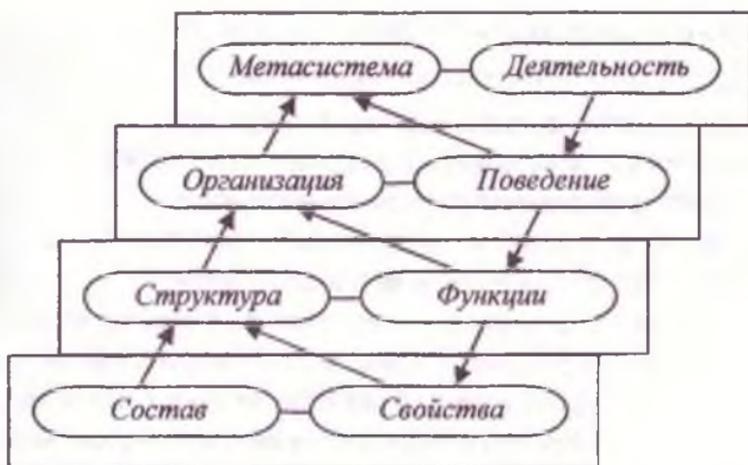


Рис. 6.2. Схема методологических уровней анализа систем

Объектом исследований в теории эффективности является операция, которая проводится в рамках *So*-системы.

### 6.2.1. Элементный уровень «состав-свойства»

Например, элементы бортовых систем КА.

Первый методологический уровень охватывает приемы и методы исследований элементов этой системы, их состав и свойства.

Методология исследований на этом уровне основательно развита в различных естественных и технических науках. Большая роль в них отводится экспериментальным исследованиям.

На этом уровне анализируются различные свойства элементов системы, выявляются их конструктивные, эксплуатационные, экономические характеристики и т. п.

Теория эффективности на данном уровне исследует в основном качества элементов системы как *совокупность их полезных свойств*.

На этом уровне понятие эффективности системы еще не вводится, поскольку система в целом и целенаправленный процесс ее функционирования не рассматриваются.

### 6.2.2. Уровень агрегатов (подсистем) «структура-функция»

Этот уровень ещё называют уровнем подсистем исследуемой системы. Применительно к КА этот уровень соответствует, например, уровню бортовых систем.

Объектом исследований на уровне «структура-функция» являются операции, проводимые в рамках ограниченных по своим масштабам и разнообразию функций  $S_0$ -систем.

Эффективность систем, изучаемых на данном уровне, может быть достаточно адекватно отражена, как правило, скалярным (обобщенным) показателем в метрической шкале.

Обычно цель операции, проводимой в рамках этих систем, достаточно четко выражена и однозначно определена.

Системы данного уровня имеют относительно простую структуру, связи между элементами стабильны, их число и разнообразие невелико, а внешняя среда имеет сравнительно постоянный характер.

Как правило, в организации поведения этих систем ведущим является *принцип перспективной активности*, а сами они рассматриваются как подсистемы некоторой более сложной системы.

**Пример.** Рассмотрим какую-либо систему управления.

Для выработки управляющего воздействия – управления (сигнала, команды, решения) – необходимо, чтобы в центральном органе управления происходило сравнение информации о состоянии внешней среды и компонентов системы с требуемым или желаемым состоянием системы во внешней среде (определение рассогласования) и вырабатывалось управление (по принципу обратной связи) по приведению системы в требуемое состояние.

Решения принимаются и в процессе функционирования систем второго уровня. Однако внешнее дополнение для этих систем может быть сформировано в рамках исследований на уровне организация-поведение в таком формализованном виде, который обеспечивает выбор решения в системах второго уровня на основе четких формальных критериев.

В этих условиях участие человека в звене управления таких систем не обязательно. В принципе эти системы могут быть автоматическими. В рамках исследований второго уровня формируется внешнее дополнение для исследования на первом уровне.

### 6.2.3. Системный уровень «организация-поведение»

На этом методологическом уровне исследуются средние и крупномасштабные операции ( $S_0$ -системы большого масштаба).

Обычно эффективность таких операций проявляется как их многомерное свойство, которое далеко не всегда удается адекватно отобразить скалярным показателем эффективности. Чаще приходится использовать *векторный* показатель. Системы данного уровня иногда называются организациями (вспомним выражение: организация СГАУ), большими человеко-машинными системами, а в последнее время организационно-техническими системами (ОТС). Организация может включать в свой состав несколько ТС, взаимодействия между которыми могут проявляться в самых различных формах (например, при реализации показателей периодичности, детальности, производительности и оперативности).

В свою очередь, ТС, представляющие собой ОТС со сложной иерархической структурой, включают в свой состав подсистемы (агрегаты), сложность которых не превышает сложности систем второго уровня исследования. Связи между подсистемами нестабильны (лабильны). Их интенсивность может изменяться во времени в зависимости от складывающихся ситуаций. Внешняя среда, как правило, имеет изменчивый динамический характер.

Системы данного уровня способны к самоорганизации (обладают  $L$ -качеством), и ведущим принципом их поведения часто является принцип рефлексии ( $\alpha$ -система). Основа деятельности таких систем строится обычно на концепции адаптивизации (например, автоматическая фокусировка ОЭТК).

Наличие в системах управления ТС людей, наделенных правом принимать решения и имеющих различные цели, вносит существенную неопределенность поведенческого характера и в значительной мере затрудняет формализованное описание  $S_0$ -системы третьего уровня ( $S_0^{III}$ ). Такая система может быть формализована лишь при условии, что достаточно четко определены гипотезы поведения субъектов системы, отражающие преследуемые ими цели. Очевидно, эффективность поведения организации будет определяться наряду с другими факторами стратегиями ее субъектов, их возможными рефлексиями, т. е. пониманием того, как представляют себе цели данного субъекта другие субъекты системы.

Сложность, а порой и невозможность верификации поведения систем данного уровня повышает роль теоретического обоснования выдвигаемых гипотез поведения ТС, что определяет необходимость исследований системы на более высоком методологическом уровне.

#### **6.2.4. Уровень «метасистема-деятельность»**

На этом уровне исследуются глобальные системы (метасистемы), включающие в свой состав организации вместе с их внешней средой. Сложность подобных систем не допускает их формального представления. Анализ метасистемы и ее деятельности возможен лишь на вербальном (описательном) уровне.

Воспринять в таком виде внешнее дополнение может лишь человек. Вот почему участие человека принципиально необходимо в звене управления системы третьего уровня.

Лицо, принимающее решение, формализуя внешнее дополнение, исходит из задач системы и использует при выработке решений определенные принципы.

Внешнее дополнение позволяет ввести объективные критерии эффективности для систем третьего уровня, исходя из полезности этих систем в деятельности метасистемы.

Деятельность метасистемы складывается из различных линий поведения организаций, ее составляющих, и преследует определенные глобальные цели.

В рамках метасистемы можно рассматривать социальный и политический строй государства, систему его хозяйства в целом или отдельные отрасли экономики и т. д. В качестве метасистемы могут рассматриваться также экономические, военно-политические и другие крупные союзы и объединения государственного и международного уровня.

Деятельность метасистемы обусловлена поведением организаций, объединенных метасистемой, ее организационными формами. В свою очередь, характер деятельности метасистемы, ее цели определяют поведение организаций, их взаимные отношения, а также структурный облик метасистемы.

#### ***Концепция метасистемы***

Исследуемая ТС третьего уровня рассматривается не изолированно, а как составная неотъемлемая часть метасистемы. С позиции метасистемы определяется полезность исследуемой системы третьего уровня, выражаемая ее эффективностью, которая связана не только со свойствами этой системы, но и со свойствами метасистемы.

Таким образом, системный подход объединяет исследования на третьем и четвертом методологических уровнях. Этот подход называют системным не только потому, что исследуемую систему представляют в виде некоторой целостности, состоящей из элементов и наделенной определенной структурой, но главным образом потому, что эту систему рассматривают с точки зрения метасистемы, ее целей, на достижение которых направлена деятельность метасистемы.

### **6.3. Принципы системных исследований эффективности**

Принципиальную неформализуемость метасистем можно объяснить, исходя, в первую очередь, из теоремы Геделя о неполноте формальных систем.

#### ***6.3.1. Сущность теоремы Геделя***

(К.Гедель – австрийский ученый, доказал обсуждаемую теорему в 1931 году).

Согласно этой теореме в рамках некоторой формальной системы невозможно вывести все истинные утверждения, относящиеся к объектам, описываемым средствами этой формальной системы. Необходима другая, более широкая система, в пределах которой формируются принципиальные положения для систем более низкого уровня, т. е. необходимо внешнее дополнение для того, чтобы справиться с геделевской трудностью.

#### ***6.3.2. Принцип внешнего дополнения***

Роль внешнего дополнения не сводится лишь к преодолению геделевской трудности, а позволяет в определенной мере:

- ограничить изучаемую на третьем уровне систему;
- вычленив её из метасистемы как некоторую целостность; выдвинуть гипотезы поведения субъектов системы;
- перейти к формализованному описанию систем на уровне «организация-поведение».

Внешнее дополнение согласует цели организаций и их поведение с целями деятельности метасистемы. Внешне цели деятельности метасистемы и поведения входящих в нее организаций могут быть весьма различными.

## **Нормативные теории**

Системный анализ, так же как и теория исследования операций, относится к нормативным теориям. Нормативная теория основывается на научных положениях, формируемых без специального обоснования статистикой, экспериментом.

По уровню строгости формулировок различают три группы таких положений: аксиомы, постулаты, гипотезы.

**Аксиома** (греч. ἀξίωμα – удостоенное, принятое положение, от ἀξιόβ – считаю достойным), положение некоторой данной теории, которое при дедуктивном построении этой теории не доказывается в ней, а принимается за исходное, отправное... (БСЭ).

**Аксиома** (др.-греч. – утверждение, положение) – утверждение, в определённых рамках (теории, концепции, дисциплины) принимаемое истинным без доказательств, которое в последующем служит «фундаментом» для построения доказательств. Утверждения на основе аксиом называются теоремами (Википедия).

**Теория** – объяснение с предоставлением доказательств максимальной степени.

**Концепция** – модель с подтверждающими её истинность фактами и (или) без них.

**Постулат** (от лат. postulatatum – требование), предложение (условие, допущение, правило), в силу каких-либо соображений "принимаемое" без доказательства, но, как правило, с обоснованием, причём именно это обоснование и служит обычно доводом в пользу постулата "принятия" постулата (БСЭ).

**Гипотеза** – недоказанное правдоподобное утверждение на основе ряда подтверждающих её наблюдений или суждений, понятий, постулатов (в науке).

Гипотезы, основанные на ложных суждениях, неправильных понятиях, постулатах, составляют псевдонауку.

Системный анализ эффективности ОТС в качестве исходных утверждений использует гипотезы ввиду сложности объекта исследования и большой степени неопределенности факторов, определяющих его эффективность.

Выдвижение гипотез осуществляется при исследовании деятельности метасистемы. Только на уровне метасистема-деятельность можно теоретически осмыслить поведение систем третьего уровня.

Таким образом, внешнее дополнение призвано исключить субъективизм исследователя, вызванный произволом в выборе критерия эффективности. Ошибка в выборе критерия может свести на нет все усилия исследователя при анализе эффективности систем.

Внешнее дополнение является тем логическим замыканием, которое в совокупности со свойствами (качеством) исследуемой системы, условиями и способами ее использования составляет необходимые условия для определения ее эффективности.

### **6.3.3. Принцип декомпозиции систем**

Этот принцип системного анализа эффективности в технике состоит в том, что сложную систему третьего уровня можно расчленить на ряд менее сложных подсистем, исследования которых могут быть проведены на втором уровне.

На рис. 6.3 в качестве примера приведено дерево декомпозиции показателей эффективности космической системы наблюдения по критериям эффективности.

Однако расчленение систем на подсистемы и общей задачи на подзадачи требует в последующем согласования действий подсистем и решаемых ими задач с целью восстановления эмерджентных (интегративных) свойств системы, утрачиваемых при ее декомпозиции. Принцип декомпозиции выступает как средство, позволяющее снижать уровень сложности исследований. Обычно легче исследовать несколько систем второго уровня, чем одну систему третьего уровня.

## **6.4. Уровни исследования систем**

Системные исследования эффективности в зависимости от степени обобщения учитываемых факторов можно разделить на *обобщенные* и *детальные*. В рамках обобщенных исследований в зависимости от целей анализа эффективности выделяют *концептуальный* и *операционный* уровни.

### **6.4.1. Концептуальный уровень исследования**

Целью концептуальных исследований является установление общих тенденций развития изучаемого процесса, форм и способов его организации, выработка концепций по всем основным вопросам

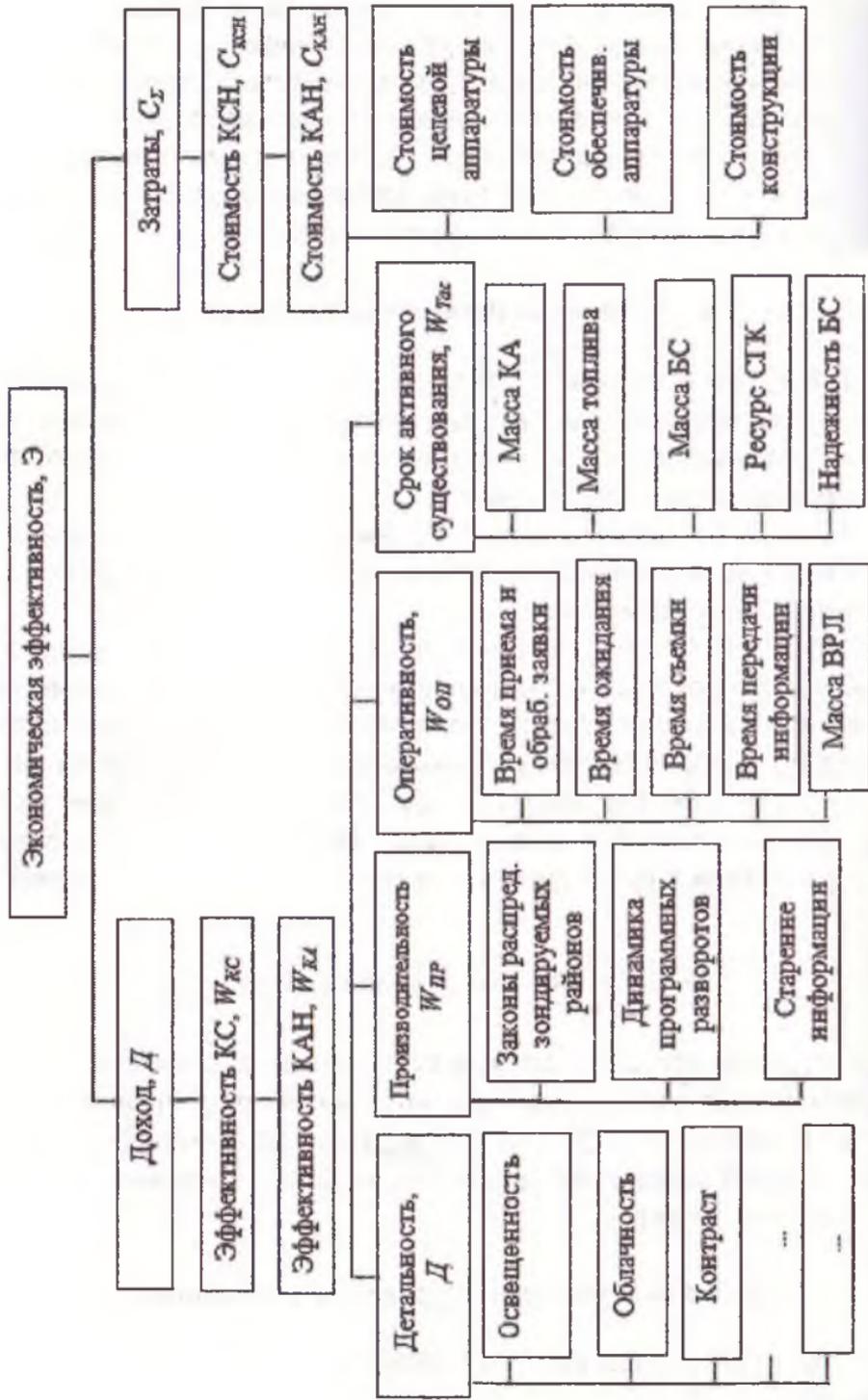


Рис. 6.3. Дерево декомпозиции показателей эффективности КСН

организации и проведение крупномасштабных операций, разработка систем целей и задач, принципов применения больших технических систем. Это исследование проводится с позиций метасистемы и организуется в основном на четвертом, а также на третьем (в общей части) методологических уровнях. Степень обобщения факторов здесь наиболее высокая.

Концептуальные исследования, как правило, проводятся на ранних этапах принятия решений для определения областей возможных стратегий на множестве концепций, устанавливаемых неформальным путем. Это обеспечивает содержательность и рациональную взаимосвязь всех остальных этапов исследования эффективности.

Рассмотрим пример концептуального исследования.

### **Формулировка задач совершенствования проекта в теоретико-множественной форме**

Имеется начальный проект космического аппарата (в нулевом приближении) с вектором проектных параметров

$$K_{KA}^{(0)} = \{K_{KA}^{(0)} : K_{KA}^{(0)} \in K_{KA}^P \subset E^N\}, \quad (6.1)$$

где  $K_{KA}^P$  - множество реализуемых проектов космического аппарата (определяется уровнем развития элементной базы космических аппаратов и технологии);

$E^N$  - множество мощностью  $N$ , обладающее свойствами так называемой  $\sigma$  - алгебры событий (множество, которое является системой подмножеств универсального множества  $V$  элементарных событий, определяющих элементы проекта). Если это множество не пустое, то оно подразумевает наличие альтернативных вариантов исполнения проекта (хотя бы одного варианта).

Воздействие конкурирующей стороны на космический аппарат описывается множеством

$$Y = \{Y : Y \in Y_C\}, \quad (6.2)$$

где  $Y_C$  - множество стратегий конкурирующей стороны.

Управляющие воздействия на КА описываются множеством

$$X = \{X : X \in X_C\}, \quad (6.3)$$

где  $X_C$  - множество стратегий управления космическим аппаратом, вследствие использования которых может повышаться выходной

эффект функционирования космического аппарата и снижаться уровень влияния конкурирующей стороны на этот эффект.

Ресурсы космического аппарата (по массам бортовых систем и элементам, по расходующимся компонентам и материалам, по мощности системы электропитания, по времени работы отдельных составных частей и т.п.) описываются множеством

$$R = \{R : R \in R^{don}\},$$

где  $R^{don}$  - множество допустимых ресурсов.

Для обеспечения целевого функционирования космического аппарата в условиях воздействия конкурирующей стороны проект должен удовлетворять требованиям:

$$W(K_{KA}^{(0)}, X, Y, R) \in W^{don},$$

где  $W(K_{KA}^{(0)}, X, Y, R)$  - эффективность функционирования космического аппарата по целевому назначению;

$W^{don}$  - множество допустимых показателей целевой эффективности космического аппарата.

Кроме того, должны быть удовлетворены требования по надежности, живучести, некоторым конструктивным ограничениям и др.

Если начальный проект удовлетворяет условию (6.1), то проект может быть принят к реализации (пересмотра проекта не требуется). В противном случае проект должен быть пересмотрен.

Пересмотр проекта сводится к отысканию множества проектных параметров, удовлетворяющих условию (6.1):

$$K_{KA}^{(1)} = \left\{ K_{KA}^{(1)} : K_{KA}^{(1)} \in K_{KA}^{don} \mid W(K_{KA}^{(0)}, X, Y, R) \in W^{don} \right\} \neq \emptyset, \quad (6.4)$$

где цифра 1 в скобках указывает на первый пересмотр проекта;

$\emptyset$  - пустое множество.

В случае если  $K_{KA}^{(1)} = \emptyset$  (если решение не удовлетворяет условию (6.4)), то подмножества  $K_{KA}^{(1)} \in K_{KA}^P \subset E^N$  необходимо расширить (увеличить мощность множества  $N$ ) путем включения дополнительных варьируемых параметров:

$$K_{KA}^{(1)} \subset K_{KA}^{(2)} \subset K_{KA}^P.$$

Затем вновь проверяется условие (6.4), и т. д. до  $k$ -го шага, при котором множество  $K_{KA}^{(k)}$  не будет пустым.

Следует отметить, что при предъявлении к космическому аппарату очень высоких требований по эффективности целевого функционирования может возникнуть предельная ситуация, когда любые изменения проектных параметров космического аппарата и использование управляющих стратегий не дают нужного результата, то есть

$$K_{KA}^{(i)} \subset K_{KA}^p \subset E^N = \emptyset.$$

В этом случае необходимо принимать решения:

- введение требований по целевому функционированию;
- введение дополнительных стратегий применения КА.

Наконец, может быть принято решение даже о снятии проекта с дальнейшей проработки.

Если влияние конкурентов на целевое функционирование космического аппарата отсутствует, то множество стратегий конкурирующей стороны можно исключить, и задача пересмотра проекта формулируется следующим образом:

$$K_{KA}^{(i)} = \left\{ K_{KA}^{(i)} : K_{KA}^{(i)} \in K_{KA}^{don} \mid W(K_{KA}^{(i-1)}, X, R) \in W^{don} \right\} \neq \emptyset \quad (6.5)$$

Отметим, что реализация приведенных формулировок задач проектирования космического аппарата требует анализа большого количества вариантов проекта. При использовании методологии и алгоритмов целенаправленного поиска рационального проекта в условиях воздействия конкурентов, например теории игр, количество рассматриваемых вариантов может быть существенно уменьшено.

Формулировка задач проектирования в теоретико-множественной форме, как упоминалось, проводится на начальных этапах формализации задач проектирования с целью определения стратегии проектирования и выявления методологических ошибок. На последующих этапах проектирования формулировки задач конкретизируются на основе критериев предпочтения (эффективности).

#### 6.4.2. Операционный уровень исследования

Операциональное исследование имеет целью более подробное изучение направлений и вариантов действий в рамках концепций, рекомендованных к дальнейшему анализу концептуальным исследованием. Степень обобщения факторов здесь ниже, чем при концептуальных исследованиях, что позволяет определить функциональные структуры операций, технические средства, которые должны приво-

доть к достижению поставленных задач, а также перечни задач конкретным подсистемам (средствам), показатели и критерии их выполнения, сами подсистемы и связи между ними.

Пример: оценка максимальной производительности КАН на витке, выбор оптимального маршрута.

Операциональные исследования организуются на втором и частично на третьем методологических уровнях с общей задачей выработки практических рекомендаций по выбору стратегий систем третьего уровня и тактик действий систем второго уровня.

### **6.4.3. Уровень детального исследования**

Детальные исследования направлены на анализ качества подсистем (агрегатов, узлов, элементов), входящих в состав систем, рассматриваемых на втором и третьем методологических уровнях. Эти исследования проводятся, как правило, на первом методологическом уровне; для них характерна низкая степень обобщения факторов.

Детальные исследования – последний уровень декомпозиции общей задачи исследования эффективности – обеспечивают решение всех вопросов, касающихся облика конкретных средств.

Концептуальные, операциональные и детальные исследования, взаимно дополняя друг друга, образуют единое целое.

Глубокое понимание методологических уровней исследования эффективности в технике, овладение методологическими принципами исследований на каждом уровне позволяют в значительной мере расширить роль метода моделирования и повысить эффективность прикладных научно-технических исследований в целом.

### **6.5. Общая схема исследований эффективности операций**

Формы исследований эффективности в технике весьма разнообразны. По-видимому, не может существовать универсальной рецептурной схемы проведения исследования эффективности операций с использованием технических систем, относящихся даже к одной отрасли техники. Однако может оказаться полезным некоторый перечень обобщенных положений, придерживаясь которого исследователь организует свою деятельность при решении конкретной научно-технической задачи, разделяя ее на этапы. Ниже приведен перечень таких положений, составляющий обобщенную схему исследования эффективности операций.

На рис. 6.4 приведена схема основных этапов исследования эффективности операций и показана связь между ними.

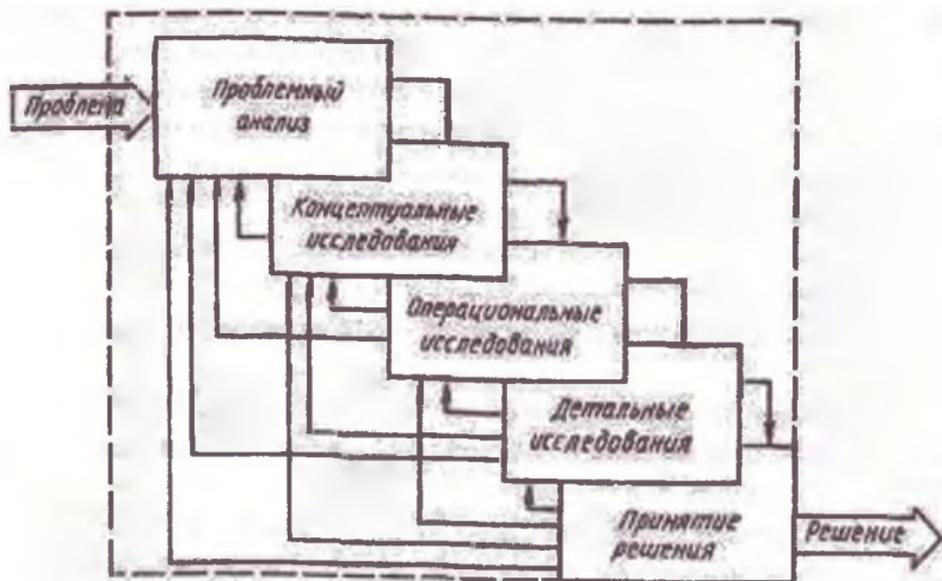


Рис. 6.4. Основные этапы исследования эффективности операций

Проблемный анализ непосредственно не входит в исследование эффективности операции. Он предвывает это исследование, являясь необходимым его начальным этапом.

Этап принятия решения носит больше организационный характер, чем исследовательский, являясь завершающей стадией всей работы.

Рассмотрим подробнее этапы общей схемы исследования операций. Порядок пунктов внутри каждого этапа в зависимости от конкретного исследования может быть изменен, а часть пунктов – опущена. Кроме того, внутри этапов, а также между этапами возможны циклы, т. е. возвраты после выполнения определенных пунктов (этапов) к предшествующим пунктам в зависимости от получаемых промежуточных результатов.

### 6.5.1. Проблемный анализ

1. Определение существования проблемы (установление, есть ли проблема в действительности или она является мнимой), установление причин ее возникновения и взаимосвязи с другими проблемами;

уяснение и формулировка проблемы, определение ее актуальности, разрешимости и срочности решения. Примером неактуальной проблемы является исследование колебаний косичек, возникающих при различных формах походки девушек. За данные исследования в 2012 году была присуждена так называемая «Шнобилевская премия».

2. Выявление, анализ и описание ситуации, т. е. комплекса условий, в которых возникла или может возникнуть проблема.

3. Формирование и анализ проблемной ситуации с использованием эвристических и формальных методов:

- определение степени полноты и достоверности информации о проблемной ситуации;

- возможности решения проблемы с учетом сложившихся условий;

- выработка при необходимости комплекса мер для получения недостающей информации и дополнительного определения проблемной ситуации.

Формирование и анализ проблемной ситуации также производится для формирования целей деятельности, решающих проблему.

4. Формирование и анализ альтернативных целей  $\alpha_0 = \{A_0^1, A_0^2, \dots, A_0^m\}$ , достижение которых решает проблему, и выбор одной из них в качестве цели операции.

(Запустить в космос миллион гвоздей по различным орбитам).

5. Анализ путей достижения цели и определение существенных ограничений (экономических, технических и др.), влияющих на выбор средств и способов достижения цели; декомпозиция сложной цели, расчленение ее на подцели и задачи.

6. Выбор средств достижения цели, обоснование уровня их качества в ряду усложняющихся уровней качества  $\pi = \{R, I, C, A, L\}$ ; оценка наличных или потребных ресурсов.

7. Общая постановка задачи исследования эффективности операции.

### 6.5.2. Концептуальные исследования

1. Описание метасистемы, анализ ее деятельности.

2. Вычленение  $S_0$ -системы, в рамках которой проводится (реализуется) операция.

3. Оценка информационной достаточности.

4. Обоснование методологического уровня исследования эффективности операции  $\nu = \{I, II, III, IV\}$ .

5. Установление типа операции ( $S_0$ -системы), исходя из уровней усложняющегося поведения  $\mu = \{e, h, c, p, a\}$ .

6. Обоснование концепции рационального поведения  $\gamma = \{П, О, А\}$ .

7. Выдвижение гипотез поведения субъектов системы.

8. Уточнение операционной ситуации.

8.1. Обоснование состава и содержания внешнего дополнения.

8.2. Формирование требуемого результата операции (целеполагание).

8.3. Выбор пространства стратегий субъектов системы.

8.4. Установление основных ограничений (дисциплинирующих условий), вытекающих из деятельности метасистемы.

9. Уточнение результата и показателей эффективности.

9.1. Выбор обобщенных показателей эффективности.

9.2. Описание результата операции (полезных эффектов и затрат).

9.3. Обоснование функции соответствия реального результата требуемому.

9.4. Выбор шкал показателей.

10. Обоснование принципа выработки концептуального решения и введение на этой основе критерия эффективности.

11. Концептуальные исследования

11.1. Концептуальное моделирование.

11.2. Кибернетическое описание операции ( $S_0$ -системы).

11.3. Выявление степени влияния факторов и их взаимодействий (факторизация задачи).

11.4. Установление направлений операциональных исследований.

11.5. Уточнение и конкретизация задач исследования эффективности операции.

### **6.5.3. Операциональные исследования**

1. Постановка задачи операционального исследования.

2. Оценка информационной достаточности.

3. Уточнение множества стратегий по результатам концептуальных исследований.
4. Уточнение характеристик активных средств, описание их свойств, оценка наличных или потребных ресурсов.
5. Выбор способа и средств операционального моделирования.
6. Формирование операциональной модели, установление перечня исходных данных, введение операторов перехода и выхода, уточнение ограничивающих условий, проверка операциональной модели.
7. Уточнение показателей эффективности операции.
8. Обоснование принципа выработки операциональных решений и уточнение критериев эффективности.
9. Операциональное моделирование, выработка рекомендаций для принятия решения в различных вариантах задачи исследования эффективности операции.

#### *6.5.4. Детальные исследования*

1. Постановка задачи детального исследования.
2. Уточнение внешнего дополнения по результатам операционального исследования (требования к качеству элементов, требования к управлению качеством и т. д.).
3. Согласование и выбор показателя и критерия оценки качества элементов технических систем.
4. Определение характеристик качества по результатам эксперимента.
5. Решение задачи удовлетворения качеству или управления качеством элементов технической системы.

#### *6.5.5. Принятие решения*

1. Анализ результатов проведенных исследований.
2. Планирование контрольных мероприятий по внедрению принимаемого решения.
3. Утверждение принятого решения.

**Пример 1.** Анализируя проблему повышения рентабельности предприятия, ЛПР производит её декомпозицию, например, следующим образом:

*«Повысить качество продукции.*

*Снизить себестоимость продукции.*

*При этом общие затраты на эти мероприятия не должны превосходить имеющихся средств».*

Результатом анализа проблемной ситуации является формальная постановка задачи, которая указывает, каких результатов, в каких условиях и к какому сроку достичь.

**Пример 2.** *«К четвертому кварталу следующего года:*

*- повысить покупательную способность товаров не менее чем на 20 %;*

*- снизить их себестоимость не менее чем на 5 %;*

*- при этом суммарные затраты не должны превосходить 20 тыс. руб.».*

В этом случае *показателем качества* продукции является *уровень покупательной способности* товаров.

Поставленная задача может быть решена различными способами. Допустимые способы (в смысле наложенных ограничений) образуют множество стратегий (альтернатив).

**Пример 3.** *Стратегиями* в примере 2 могут являться:

*- закупка в пределах выделенных ассигнований более качественного сырья;*

*- формирование премиального фонда за дополнительно реализованную продукцию;*

*- модернизация оборудования;*

*- повышение квалификации рабочих;*

*- сокращение управленческого аппарата;*

*- закупка лицензий и др.*

Каждая из указанных стратегий считается *чистой* стратегией, если на её реализацию расходуются *все* имеющиеся *средства*.

Указанные средства могут делиться в определенной пропорции между стратегиями. Такие сложные стратегии также входят во множество допустимых альтернатив.

Каждая из допустимых альтернатив обеспечивает, как правило, различный уровень решения поставленных задач.

Например, имеются две альтернативы, приводящие к исходам операции со значениями показателей *покупательной способности, себестоимости и затрат* соответственно:

(25 %, 6 %, 9000 руб.);

(29 %, 8 %, 15000 руб.).

Указать, какая лучше из них, может лишь конкретное ЛПР применительно к понимаемой именно им данной задаче и именно в данный момент времени (сейчас и сегодня, а не завтра и потом).

Информация о предпочтениях (т. е. о представлениях ЛПР о «лучшем» и «худшем» на множествах целей, задач, условий, способов и исходах операций) может иметь качественный или количественный характер.

Так, мнение ЛПР о том, что увеличение одних показателей внесит больший вклад в достижение цели операции по сравнению с изменением других, является качественной информацией об относительной важности показателей.

Если же ЛПР может количественно оценить, насколько изменение одного показателя может быть компенсировано соответствующим изменением других или же во сколько раз один показатель важнее другого, то такая информация о предпочтениях относится к количественной.

Например, ЛПР может указать, что увеличение покупательной способности на 1 % эквивалентно снижению себестоимости продукции на 0,5 % в достаточно узкой области значений оцениваемых показателей.

## **6.6. Пример постановки задачи синтеза системы**

### ***Первоначальная постановка задачи***

Такая постановка основывается на некотором интуитивном «чувстве необходимости» создания СТС или ОТС и представляет собой некоторое качественное описание субъективных пожеланий.

Например, для быстрого определения районов катастроф и бедствий и их масштабов необходимо создать систему наблюдения.

Более детальную постановку вначале исследования сделать затруднительно, так как отсутствует необходимая информация.

### ***Уточнение постановки задачи***

#### **Первый этап.**

Изучение дополнительной информации, выбор альтернативных путей достижения цели.

Рассмотрение расширенной задачи. то есть задачи более высокого уровня иерархии или задачи того же уровня, но охватывающей более широкий состав рассматриваемых компонентов.

Например, исследуются возможные системы наблюдения:

- наземная разведка;
- малые беспилотные летательные аппараты;
- аэрофотосъемка;
- космическая съемка.

#### Второй этап.

Рассматривается *организационный аспект*. Принимают во внимание условия выполнения задачи:

- располагаемые сроки;
- ресурсы (денежные, людские, материальные, экспериментальная база, информационное обеспечение);
- возможные препятствия.

#### Третий этап.

*Сужение задачи.*

*Уточнение цели.*

*Формирование ограничений.*

Например, принято решение о проектировании КСН. Цель этой системы: получение высокодетальных снимков земной поверхности 1 раз в сутки любого района Земли с оперативностью доставки информации не более четырёх часов.

#### Четвёртый этап.

Описание СТС в виде тактико-технических требований (ТТТ).

Эти ТТТ излагаются в документе, который называется «Тактико-техническое задание на создание СТС».

*Формирование требований к системе*

Например, для космической системы наблюдения требования могут быть следующими.

1. Детальность 0,2 м.
2. Обзорность – глобальная.
3. Ширина полосы обзора – 20 км.
4. Ширина полосы захвата – 1000 км.
5. Точность привязки цели – 50 м.
6. Производительность – 40 объектов за виток и 450 – за сутки.
7. Оперативность доставки информации на Землю – 15 мин.
8. Срок активного существования – 5 лет.
9. Стоимость не более 1 млрд. руб.

Далее, как упоминалось, требования, которые надо безусловно выдержать, относят к показателям качества, например требования 1-5, а требования, которые необходимо улучшать – к показателям эффективности, например требования 6-9.

Затем формируется структура системы, после этого приводят описание условий работы:

- а) днем;
- б) безоблачно;
- в) имеется противодействие в виде радиопомех.

Далее приводится описание логических моделей операции и т.д..

### 6.7. Формальные схемы исследования эффективности операции

С формальной точки зрения на этапе проблемного анализа реализуется отображение

$$\alpha_0 \times \pi \rightarrow M_1, \quad (6.6)$$

где  $M_1$  – множество метасистемных описаний определенных технических отраслей.

Отображение (6.6) каждой паре «цель – средство ее достижения» ставит в соответствие конкретное метасистемное описание технической области, совокупность средств которой способна рационально решить выявленную проблему.

На этапе концептуальных исследований реализуется отображение

$$M_1 \times \mu \times \nu \times \gamma \rightarrow M_2, \quad (6.7)$$

где  $M_2$  – множество вариантов внешнего дополнения с конкретным описанием  $S_0$  – системы, в рамках которой реализуется исследуемая операция.

Или  $\alpha_0 \times \pi \times \mu \times \nu \times \gamma \rightarrow M_2$ .

Операциональное исследование формально можно представить отображением

$$M_2 \times D \rightarrow U^*, \quad (6.8)$$

где  $D$  – множество вариантов исходных данных задачи выбора рационального решения;  $U^*$  – множество рациональных решений при различных вариантах исходных данных.

Или  $\alpha_0 \times \pi \times \mu \times \nu \times \gamma \times D \rightarrow U^*$ .

Этап принятия решения реализует отображение

$$U^* \times \sigma \rightarrow U^*, \quad (6.9)$$

где  $\sigma$  – множество возможных ситуаций, сложившихся к моменту принятия решения.

Последовательная реализация отображений (6.6) – (6.9) представляет собой формальную схему исследования эффективности операции.

Подобный формальный подход является основой для автоматизации системных исследований эффективности в технике, в частности, для разработки проблемно-ориентированных автоматизированных систем проектирования ОТС.

Однако отображения (6.6) – (6.7) имеют большую степень неопределённости и от их конкретных видов существенно зависит практическая реализуемость такого подхода.

По мере исследования проблемы и накопления знания о ней степень размытости (нечеткости) отображений (6.6) – (6.7) может быть в значительной мере снижена.

Реальный путь к решению проблем исследования эффективности ОТС состоит в разработке соответствующего математического обеспечения в виде крупных проблемно-ориентированных имитационных систем.

## Контрольные вопросы

1. Поясните принципы усложняющегося поведения систем.
2. Поясните принципы: вещественно-энергетического баланса; гомеостаза; перспективной активности; рефлексии.
3. Назовите методологические уровни исследования эффективности технических систем.
4. Охарактеризуйте следующие уровни:
  - элементный уровень «Состав-свойства»;
  - уровень агрегатов (подсистем) «Структура-функция»;
  - системный уровень «Организация-поведение»;
  - уровень «Метасистема-деятельность».
5. Поясните сущность теоремы Геделя и принципы системных исследований эффективности: внешнего дополнения; декомпозиции систем.

6. Приведите общую схему исследования эффективности операции.

7. Что Вы знаете о следующих уровнях исследования:

- проблемный анализ;
- концептуальные исследования;
- операциональные исследования;
- детальные исследования;
- принятие решения.

8. Приведите пример постановки задачи синтеза космической системы наблюдения.

9. Приведите формальные схемы исследования эффективности операции.

## 7. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМНОЙ СИТУАЦИИ И ЗАДАЧ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

### 7.1. Проблемная ситуация

Для того чтобы решить проблему, стоящую перед ЛПР, необходимо представить её в виде одной или нескольких задач. Переходным этапом от проблемы к постановке формальных задач является *проблемная ситуация*, в ходе которой вербальная цель разбивается на подцели (задачи) и устанавливаются общие ограничения.

Результатом анализа проблемной ситуации является формальная постановка задачи.

Поставленная задача может быть решена различными способами (альтернативными стратегиями).

Указать, какая из стратегий лучше, как упоминалось, может лишь конкретное ЛПР применительно к понимаемой именно им данной задаче и именно в данный момент времени (сейчас и сегодня, а не завтра и потом).

Это означает, что при выборе решения необходимо использовать помимо анализируемой ещё и дополнительную информацию о предпочтениях ЛПР, *его отношении к риску (из-за неопределенности условий проведения операции)*, об интересах других субъектов операции.

Вопросы *принятия решений*, относящиеся к постановке задачи, связаны:

- со структуризацией исходной информации о проблеме;
- анализом неопределенностей;
- формированием исходного множества стратегий;
- выбором показателя эффективности;
- выбором критерия эффективности.

### 7.2. Модель проблемной ситуации

Модель проблемной ситуации отображает взаимосвязи основных элементов процесса выработки решения и последовательность формирования частных задач.

Она составляется для того, чтобы охватить проблему выработки решения в целом, представить её основные элементы, которые необходимо сформировать для получения окончательного решения о стратегии проведения операции.

Обозначим:

$U$  – множество стратегий ЛПР;

$\Lambda$  – множество значений определенных и неопределенных факторов;

$G$  – множество исходов операции;

$Y$  – вектор характеристик (признаков) исхода  $g \in G$ , т. е. числовое выражение результата операции;

$H$  – модель, т. е. отображение, ставящее в соответствие множествам стратегий  $U$  и факторов  $\Lambda$  множество результатов  $Y(G)$ , или в символическом виде  $H : U \times \Lambda \rightarrow Y(G)$ ;

$W$  – показатель эффективности;

$\Psi$  – оператор соответствия «результат – показатель», в сокращённом символическом виде  $\Psi : Y(G) \xrightarrow{\theta} W$ , или в полном символическом виде  $\Psi : \{Y | H : U \times \Lambda \xrightarrow{\theta} Y(G)\} \xrightarrow{\theta} W$ ;

$K$  – критерий эффективности ( $W \rightarrow K$ );

$\mathcal{P}$  – модель предпочтений ЛПР (что лучше, что хуже, что безразлично, что – ни в коем случае и т.д.) на элементах множества:

$D = \{U, \Lambda, G, Y, W, K\}$ ;

$\theta$  – информация о проблемной ситуации.

Тогда обобщенная модель проблемной ситуации представляется в виде системы:

$$\langle U, \Lambda, H, G, Y, \Psi, W, K, \mathcal{P}, \theta \rangle. \quad (7.1)$$

Наличие компоненты  $\Lambda$  как самостоятельного элемента в модели проблемной ситуации (7.1) предполагает, что множество значений неопределенных факторов при выработке решений будет либо обязательно установлено (задано извне), либо отыскание этих значений будет представлять самостоятельную задачу.

Проблема выбора показателя эффективности  $W$  связана с установлением вида функции соответствия результата операции  $Y(G)$  требуемому результату  $Y^{mp}$ .

Модель предпочтений  $\mathcal{P}$  есть формализованное представление ЛПР о «лучшем» и «худшем» среди элементов некоторого множест-

ва. С помощью этой модели решаются важные частные задачи, связанные со следующими действиями:

- формированием исходного множества альтернатив  $U$ ;
- выделением существенных факторов  $\Lambda$ , определяющих условия проведения операции;
- построением моделей  $H$  и  $\Psi$ ;
- выбором характеристик  $Y$  исходов  $g \in G$ ;
- построением на их основе частных показателей эффективности;
- преобразованием показателей эффективности в некоторый обобщенный показатель);
- установлением критерия  $K$  и т. д.

Во многих практических случаях оказывается, что априорное задание одного из основных критериев эффективности (пригодности, оптимальности, адаптивности) приводит к выделению, как правило, некоторого множества «нехудших» альтернатив. В этом случае для однозначного выбора лучшей альтернативы необходимо формирование составного критерия — решающего правила, включающего как формальные, так и неформальные предписания по вынесению суждения. Это решающее правило и задаётся элементами модели предпочтений  $\mathcal{P}$  на множествах  $G - \mathcal{P}_G, Y - \mathcal{P}_Y, W - \mathcal{P}_W$  и т. д.

Взаимосвязь указанных компонент модели проблемной ситуации приведена на рис. 7.1. Стрелками на рисунке показаны отношения между элементами проблемной ситуации. Символом  $A_0$  на рис. 7.1 обозначена цель операции.

Сообразуясь с информацией  $\theta_{A_0}$  о цели операции, ЛПР последовательно формирует множества  $U$  и  $\Lambda$  на основе информации  $\theta_U$  и  $\theta_\Lambda$ , опираясь на подмодели  $\mathcal{P}_U$  и  $\mathcal{P}_\Lambda$  модели предпочтений  $\mathcal{P}$ .

Аналогично на основе подмоделей предпочтений  $\mathcal{P}_G$  и  $\mathcal{P}_Y$  и с учетом информации  $\theta_H$  об имеющихся средствах построения моделей  $H$  выбираются характеристики  $Y$  исхода  $G$  и устанавливается вид соответствия

$$H: U \times \Lambda \rightarrow Y(G),$$

а также формируется величина требуемого результата  $Y^{mp}$ .

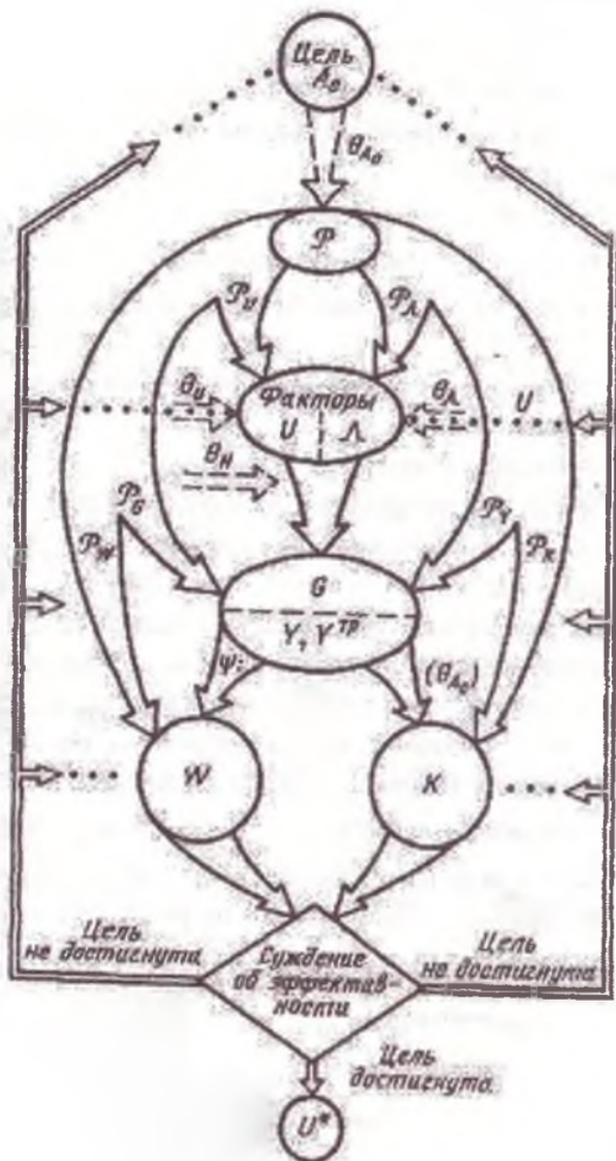


Рис. 7.1. Схема построения модели проблемной ситуации

Далее по информации  $Y, Y^{TP}$  с учетом предпочтений  $P_W$  о виде показателя эффективности устанавливается один из возможных видов метрики  $\rho(Y, Y^{TP})$  и формируется модель  $\Psi$  «результат – показатель».

Одновременно формируется критерий  $K$  по информации  $\theta_{A_0}$  и подмодели предпочтения  $\mathcal{P}_K$ , которая может задавать критерий в форме решающего правила.

На основе суждения о степени достижения цели операции либо осуществляется выбор лучшей альтернативы из множества  $U^* \in U$ , либо осуществляется возврат и коррекция элементов модели проблемной ситуации.

Задачи, соответствующие двум основным процессам принятия решений при исследовании эффективности, формируются на основе модели проблемной ситуации и имеют вид:

для процесса получения результатов

$$\Psi : \{Y|H : U \times \Lambda \xrightarrow{\theta} Y(G)\} \xrightarrow{\theta} W ; \quad (7.2)$$

для процесса анализа результатов

$$\mathcal{P} \xrightarrow{\theta} K : U \xrightarrow{W} U^* . \quad (7.3)$$

В формуле (7.2) запись

$$H : U \times \Lambda \xrightarrow{\theta} Y(G)$$

означает множественность моделей, соответствующих системным уровням исследования. При этом, исходя из концепции метациели (внешнего дополнения), информация  $\theta$  для низших уровней иерархии может быть получена либо с верхнего уровня, либо сформирована на основе информации от ЛПР рассматриваемого системного уровня.

В выражении (7.3) символом  $U^*$  обозначено подмножество «наилучших» с точки зрения ЛПР стратегий, из которых окончательно выбирают реализуемое решение  $u^* \in U^*$ .

### 7.3. Задачи принятия решений

На основе модели проблемной ситуации (7.1) могут быть получены различные постановки частных задач принятия решений. Каждую такую задачу в математических терминах обобщённого уровня можно представить в виде логического высказывания типа: (Дано; требуется определить). В этом случае символ «;» разделяет две стороны проблемы — то, что известно, и то, что требуется найти.

Для этапа постановки задачи характерны следующие частные задачи принятия решений.

### 7.3.1. Задача структуризации исходной информации

Поскольку все пункты проблемного анализа представляют структуризацию исходной информации о проблеме, то формально этот этап может быть сформулирован как следующая задача:

$$\langle \theta; \theta_{A_0}, \theta_U, \theta_\Lambda, \theta_\mathcal{P} \rangle, \quad (7.4)$$

где  $\theta_{A_0}$  - информация о цели;

$\theta_U$  - информация о стратегиях;

$\theta_\Lambda$  - информация о факторах (определённых и неопределённых);

$\theta_\mathcal{P}$  — часть общей информации о проблеме, касающаяся предпочтений лица, принимающего решения.

В свою очередь,  $\theta_\mathcal{P}$  можно представить в виде совокупности следующих множеств:

$$\theta_\mathcal{P} = \{ \theta_{\mathcal{P}_G}, \theta_{\mathcal{P}_Y}, \theta_{\mathcal{P}_U}, \theta_{\mathcal{P}_\Lambda}, \theta_{\mathcal{P}_K} \},$$

где  $\theta_{\mathcal{P}_G}$  - информация о возможных исходах  $G$  операции и различии их по предпочтительности относительно цели операции  $A_0$ ;

$\theta_{\mathcal{P}_Y}$  - информация о существенных характеристиках исхода  $Y(g \in G)$ ;

$\theta_{\mathcal{P}_U}$  - информация о возможных способах (стратегиях)  $U$  достижения цели операции;

$\theta_{\mathcal{P}_\Lambda}$  - информация об условиях проведения операции  $\Lambda$ ;

$\theta_{\mathcal{P}_K}$  - информация о возможных концепциях (гипотезах) рационального поведения системы для определения (в дальнейшем) критерия эффективности.

Эта задача решается только эвристическими методами.

### 7.3.2. Задача анализа неопределенности

Классификация факторов по характеру неопределенности является одним из результатов решения задачи анализа вида

где  $\theta_{A_0}$  – информация о цели операции;

$\theta_{\Lambda}$  – информация о характеристиках множества факторов;

$\Lambda_{\Omega}$  – множество неопределённых факторов.

Решение этой задачи требует привлечения и анализа информации, получаемой на основе:

- аналогий;
- исторического опыта;
- экспериментальных и статистических данных;
- результатов экспертиз.

Эта задача может успешно решаться лишь в том случае, если будут созданы мощные базы данных и базы знаний.

Это позволит оперативно получать, анализировать и обрабатывать информацию, касающуюся:

- природы неопределённых факторов;
- диапазонов изменения неопределённых факторов;
- априорного распределения вероятностей на диапазонах изменения факторов;
- психологических особенностей принятия решений другими субъектами исследуемой системы;
- типов взаимодействия между субъектами исследуемой системы (нейтральное поведение, содействие, противодействие) и др.

К важнейшим задачам типа (7.5) относятся задачи математической статистики, касающиеся параметрического и непараметрического оценивания, идентификации, кластеризации, прогнозирования [18].

Класс применяемых методов решения этих задач широк и достаточно хорошо разработан. Например, по существующим оценкам только методов прогноза насчитывается свыше 150. К ним относятся, прежде всего:

- морфологический анализ;
- корреляционный анализ;
- регрессионный анализ;
- факторный анализ;
- спектральный анализ;
- аппарат цепей Маркова;
- метод группового учета аргументов;
- методы распознавания образов и др.

### 7.3.3. Задача формирования исходного множества стратегий

Формальная постановка этой задачи (см. схему модели проблемной ситуации на рис 7.1) выглядит следующим образом:

$$\langle \theta_A, \theta_U, \theta_\Lambda, \theta_{P_U}, \Lambda; U \rangle. \quad (7.6)$$

С одной стороны, множество альтернатив  $U$ , «заполняющее пустоту» между желаемым результатом (целью операции) и условиями ее проведения ( $\Lambda$ ), должно быть по возможности более широким. Это обеспечит в дальнейшем свободу выбора решений ЛПР и сведёт к минимуму возможность упустить «лучшее» решение  $u^* \in U$ .

С другой стороны, исходное множество стратегий  $U$  должно быть обозримым и, следовательно, достаточно узким, что позволит ЛПР в дальнейшем провести верификацию альтернатив на имеющихся в его распоряжении моделях при ограничениях на ресурсы (время, деньги и т. п.).

**Верификация** (от лат. *verus* – истинный, *facere* – делать) – проверка, проверяемость, способ подтверждения каких-либо теоретических положений, алгоритмов, программ и процедур путем их сопоставления с опытными (эталонными или эмпирическими) данными, алгоритмами и программами.

Верифицировать соответствие конечного продукта predetermined требованиям возможно, в зависимости от ситуации, по прямым и косвенным характеристикам этого конечного продукта.

Многие компоненты задачи формирования исходного множества стратегий явно не заданы и эвристически формируются ЛПР. Проблема удовлетворения противоречивых требований к множеству исходных стратегий  $U$  должна решаться по следующим основным направлениям, которые диктуются подмоделью предпочтений  $P_U$ .

1. При решении вопроса о включении той или иной альтернативы  $u$  в множество  $U$  следует ориентироваться на цель операции, определяя, каков будет ответ на вопрос: обеспечивает ли данный вариант действий  $u \in U$  достижение желаемого результата в условиях  $\Lambda$  хотя бы в принципе?

Уже этот этап позволяет ЛПР отсеять огромную часть потенциального множества альтернатив из-за их очевидной непригодности с точки зрения достижения цели операции.

Такая «очевидность» весьма субъективна. Она отражает способность ЛПР увидеть среди множества возможных целей (если цель не задана экзогенно, извне) главную, а также предсказать возможные цели на будущее.

Сформированное таким образом множество  $U_{A_0}$  можно назвать целевым.

2. Среди всех альтернатив множества  $U_{A_0}$  необходимо на основании информации  $\theta_U$  выделить подмножество  $U_\phi$  физически реализуемых стратегий, отвечающих требованию: может ли быть данная альтернатива  $u \in U_{A_0}$  реализована сейчас или в заданные на операцию сроки?

Решение этого вопроса связано с уровнем общетеоретических и конструкторских разработок, с прогнозом их развития.

Кроме того, в множество  $U_\phi$  включаются только те альтернативы, которые удовлетворяют ограничениям по затратам, качественно оцениваемым ЛПР и экспертами. Причём эти затраты включают также средства, выделяемые на дополнительные исследования, обеспечивающие готовность альтернативы к заданному сроку начала операции.

3. Множество физически реализуемых целевых стратегий  $U_\phi \subseteq U_{A_0}$  должно быть проверено на недоминируемость по полноте охвата факторов « $\Lambda$  – информация  $\theta_\Lambda$ ». Это означает, что ЛПР должно ответить на вопросы:

- имеются ли среди множества  $U_\phi$  такие стратегии  $U_A$ , которые обеспечивают свободу выбора решений в ходе операции?

- являются ли эти стратегии «гибкими» по отношению к изменяющимся неопределенностям природного и поведенческого характера?

Таким образом, для дальнейшего рассмотрения остаются лишь те стратегии  $U_a \subseteq U_\phi$ , которые обеспечивают:

- возможность эффективной корректировки первоначально намеченного плана операции при изменении условий её проведения;

- стратегии, инвариантные к условиям.

Первое означает, что риск (потери), связанный с корректировкой плана в ходе операции, будет минимальным. Второе — выбор стратегий на основе прогноза поведения других субъектов операции обеспечит выгодное течение операции.

Такая процедура (см. пункты 1, 2 и 3) выделения исходного множества стратегий  $U = U_a$  носит циклический характер, предполагающий возврат к «старому» на более высоком уровне в случае выявления противоречий на одном из приведённых этапов.

### 7.3.4. Задача моделирования исходов операции

В рамках рассматриваемых моделей проблемной ситуации формальная запись задачи моделирования исходов операции, т. е. построения отображения  $H$ , выглядит следующим образом:

$$\langle \theta_{A_0}, U, \Lambda, \theta_H, \mathcal{P}_G, \mathcal{P}_Y; Y, \{H\} \rangle, \quad (7.7)$$

где  $G$  – исходы операции;

$Y$  или  $Y(G)$  – результаты операции;

$\{H\}$  – веер моделей ( $H$  – соответствие моделей

$$H: U \times \Lambda \xrightarrow{\theta} Y(G)).$$

Напомним, что исходы и результаты  $Y$  операции в общем случае могут совпадать или быть различными. Например, если в качестве исхода  $G$  принять квадратные метры построенного жилья, то в качестве результата  $Y(G)$  могут быть приняты: а) квадратные метры построенного жилья; б) показатель снижения нуждаемости в жилье; в) полученная прибыль. Показатели а) и б) важны для департамента строительства, а показатель в) – для строительной организации.

Необходимость, в общем случае, рассмотрения не одной модели  $H$ , а многоуровневой их иерархии  $\{H\}$  определяется особенностью трёхуровневой схемы исследования эффективности, при которой описание более высокого уровня зависит от обобщённых и факторизованных переменных низшего уровня.

Такой подход при решении задачи моделирования исходов операции позволяет:

- структурировать процесс моделирования операции в целом,
- существенно облегчить оценивание её эффективности,
- выявить наиболее значимые факторы, определяющие эффективность.

Такая методология решения задачи (7.7) предъявляет вполне определённые требования к моделям, используемым на различных уровнях иерархии исследования.

### 7.3.5. Задача моделирования цели операции

Для того чтобы исследования были содержательными (т. е. были бы получены некоторые количественные оценки для выработки решения), прежде всего необходимо достаточно аккуратно и чётко формализовать цель операции. Такая постановка задачи исследования эффективности операции вынуждает использовать количественные шкалы при формализации цели операции. Формализация цели операции должна базироваться на концепции внешнего дополнения, как необходимом условии получения обоснованного решения.

Цели и задачи операции гомоморфно отображаются в систему показателей их достижения.

**Гомоморфизм** [от греч. *омос* – общий и *морфн* – форма] – отображение основного множества одной алгебраической системы на основное множество другой, сохраняющее основные операции и предикаты (утверждения).

Вводится критерий эффективности. Система «показатель эффективности – критерий» образует модель цели операции (рис. 7.2). Задача моделирования цели операции формально ставится следующим образом:

$$\langle \theta_{A_0}, U, \Lambda, Y^{mp}, Y(G), \mathcal{P}_W, \mathcal{P}_K; W, K \rangle. \quad (7.8)$$



Рис. 7.2. Схема модели цели операции

В некоторых случаях цель  $A_0$  операции задается вышестоящим органом в виде параметров целеполагания  $Y^{mp}$ . Это обстоятельство отражено в (7.8) тем, что  $Y^{mp}$  стоит в левой части — «Дано». В общем случае параметры целеполагания являются результатом решения задачи:

$$\langle \theta_{A_0}, U, \Lambda, \mathcal{P}_W, G; Y^{mp} \rangle. \quad (7.9)$$

Цель операции накладывает вполне определенный отпечаток на вид показателя эффективности и на сам критерий, точнее на принцип его выбора.

Числовая функция, характеризующая степень достижения цели  $A_0$  операции, может рассматриваться в качестве показателя эффективности лишь при соблюдении следующих требований (см. п. 4.1.1).

А. Соответствие цели.

Б. Содержательность.

В. Измеримость.

Г. Интерпретируемость.

Д. Соответствие системе предпочтений ЛПР.

Ж. Минимальность числа используемых частных показателей.

И. Полнота.

Эти требования более подробно были раскрыты ранее.

Некоторые требования, предъявляемые к показателям эффективности, оказываются противоречивыми, то есть невозможно удовлетворить всем требованиям сразу.

Например, ЛПР по значению показателя должен полностью представлять себе степень достижения цели (соответствие цели). Это приводит к необходимости удовлетворения требования полноты, которое противоречит требованию минимальности. Требование содержательности и интерпретируемости входит в противоречие с требованием измеримости, поскольку показатели эффективности могут не иметь адекватной физической шкалы (например, оценка эстетичности, эргономичности, новизны и т. п.) и их приходится описывать субъективными оценками.

### *7.3.6. Задача моделирования предпочтений*

При решении всех изложенных выше задач перед ЛПР стоит проблема выбора объектов, подлежащих дальнейшему рассмотрению, из множества имеющихся. Осуществляя такой выбор, ЛПР руководствуется своей системой предпочтений.

Эта система предпочтений может быть выявлена и измерена в ходе контрольного предъявления ЛПР объектов из представленной совокупности. Выявленная и измеренная система предпочтений ЛПР называется моделью предпочтений.

Разработаны специальные методы моделирования предпочтений ЛПР, использующие формальные и неформальные процедуры.

Общая постановка задачи моделирования предпочтений формально записывается в следующем виде:

$$\langle D, \theta; \mathcal{P}_D \rangle, \quad (7.10)$$

где  $D = \{U, A, Y, G, W, K\}$  – множество вариантов исходных данных задачи.

Задачу (7.10) надо понимать следующим образом. На основе имеющейся информации  $\theta$  и результатов контрольного предъявления объектов, входящих в подмножество множества  $D$ , выявить систему предпочтений  $\mathcal{P}$  ЛПР.

Построение модели  $\mathcal{P}$  может быть осуществлено с помощью получаемой от ЛПР специальной дополнительной информации, которая называется информацией  $\Theta \subset \theta$  о предпочтениях. Типичными примерами такой информации являются:

- независимость частных показателей по предпочтению;
- аддитивная независимость показателей;
- качественная информация об относительной важности;
- коэффициенты важности и др.

#### 7.4. Классификация задач принятия решений

В основу классификации задач принятия решений могут быть положены различные системы признаков. Однако сложившаяся практика исследования эффективности технических систем показывает, что наиболее общими и существенными признаками классификации являются:

- число лиц, принимающих решения;
- вид показателя эффективности;
- степень определенности информации о проблемной ситуации;
- зависимость элементов модели проблемной ситуации от времени.

*По признаку числа ЛПР* различают задачи *индивидуального и группового* принятия решений. Индивидуальные решения принимаются одним лицом, а групповые — коллективным органом (группой лиц). При групповом выборе решений определяющую роль играет задача согласования индивидуальных предпочтений членов группы. Главное здесь — объединить предпочтения отдельных лиц в единое мнение (групповое предпочтение).

В зависимости от *вида* используемого *показателя эффективности* задачи принятия решений подразделяют на задачи *со скалярным* и *векторным* показателями эффективности, которые часто еще называют соответственно скалярными и векторными задачами принятия решений.

По признаку *степени определенности информации о проблемной ситуации* различают задачи принятия решений в условиях *определённости* и *неопределённости*.

Задачи принятия решений в условиях определённости (детерминированные задачи) характеризуются наличием полной и достоверной информации о проблемной ситуации, целях, ограничениях и последствиях принимаемых решений. В этих задачах относительно каждой стратегии  $u \in U$  заранее, до проведения операции, известно, что она неизменно приводит к некоторому конкретному исходу (результату).

Задачи принятия решений в условиях неопределённости подразделяются в свою очередь на задачи в условиях стохастической и нестохастической неопределённости, а последние — на задачи принятия решений в условиях *природной* и *поведенческой* неопределённости.

По *способу описания неопределенностей* нестохастического характера различают задачи принятия решений в *чёткой* и *нечёткой* постановке.

Характерная особенность всех задач принятия решений в условиях неопределенности состоит в том, что исход операции зависит кроме стратегий оперирующей стороны и фиксированных факторов также от неопределенных факторов, не подвластных оперирующей стороне и неизвестных ей в момент принятия решения (или известных с недостаточной точностью). В результате влияния неопределенных факторов каждая стратегия  $u \in U$  оказывается связанной с множеством возможных исходов операции, что существенно осложняет процесс выработки решения.

По *признаку зависимости элементов модели проблемной ситуации от времени* различают статические и динамические задачи принятия решений. Динамические задачи значительно сложнее статических, поскольку некоторые элементы динамических задач принятия решений зависят от функций времени, описывающих поведение динамических объектов, участвующих в операции.

Классификация задач принятия решений по перечисленным признакам приводит к различным комбинациям типов задач. Например, некоторая задача может быть классифицирована как статическая векторная задача группового принятия решений в условиях определенности. Возможны и другие комбинации.

Для решения различных типов задач разработаны определенные методы, основные из которых приведены в табл. 7.1. Задачи, не вошедшие в рубрику таблицы, могут быть решены приведенными в ней методами с привлечением специальных приёмов.

Таблица 7.1. Методы решения основных классов задач

| Факторы          |               | Показатель эффективности                  |                                                                      |
|------------------|---------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|                  |               | Скалярный                                 | Векторный                                                            |
| $\Lambda_F$      |               | Методы математического программирования   | Методы принятия решений в условиях определённости                    |
| $\Lambda_\Omega$ | $\Lambda_E$   | Методы стохастического программирования   | Методы принятия решений в условиях стохастической неопределённости   |
|                  | $\Lambda_J^N$ | Методы решения игр с «природой»           |                                                                      |
|                  | $\Lambda_J^B$ | Методы решения матричных игр <sup>2</sup> | Методы решения биматричных игр со строгим и нестрогим соперничеством |

В этой таблице введены следующие обозначения;

$\Lambda_F$  — множество определенных факторов;

$\Lambda_E$  — множество случайных факторов;

$\Lambda_J^N$  — множество факторов «природной» неопределенности;

$\Lambda_J^B$  — множество факторов «поведенческой» неопределенности.

### Контрольные вопросы

1. Расскажите о проблеме принятия решений (с примерами).
2. Приведите формальные записи модели проблемной ситуации.
3. Приведите формальные записи следующих задач принятия решений:
  - структуризации исходной информации;

<sup>2</sup> Классификация задач принятия решений в конфликтных ситуациях ( $\Lambda_J$ ) проведена только по виду показателя эффективности и не учитывает структуру множеств стратегий игроков (конечное, бесконечное).

- анализа неопределенности;
- формирования исходного множества стратегий;
- моделирования исходов операции;
- моделирования цели операции;
- моделирования предпочтений.

## 8. ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

### 8.1. Жизненный цикл организационно-технической системы

В процессе становления и развития техническая система проходит несколько этапов своего жизненного цикла. Единой классификации этих этапов для всего многообразия технических систем не существует.

Часто этапы жизненного цикла системы объединяют в периоды. Различают обычно два периода: *реализационный* (или период создания системы) и *эксплуатационный* (или период полезной жизни системы), как это показано на рис. 8.1.

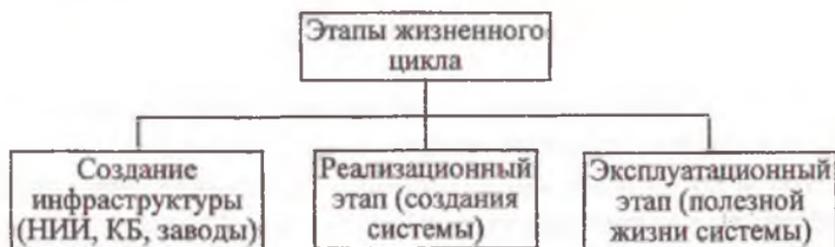


Рис. 8.1. Деление этапов жизненного цикла системы на реализационный и эксплуатационный

Каждый из этапов может быть разделен на более детальные этапы или стадии [18].

На рис. 8.2 представлена схема декомпозиции реализационного этапа на более детальные этапы.

Ввод в эксплуатацию основных подсистем согласно выработанному плану является целью этапа серийного производства.

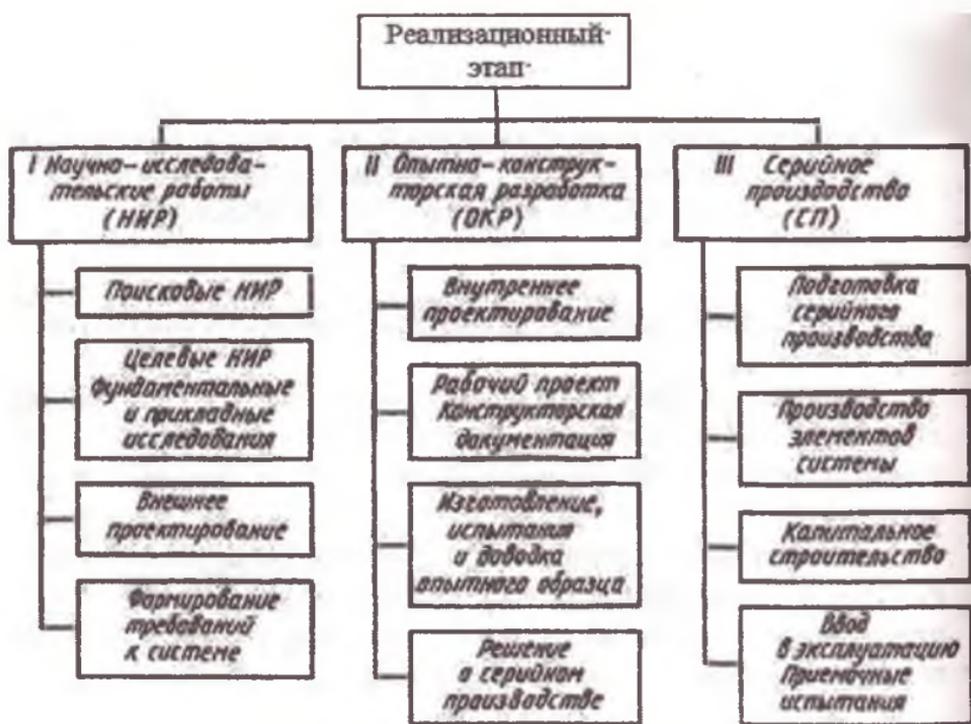


Рис. 8.2. Декомпозиция реализационного этапа

На рис. 8.3 представлена схема декомпозиции эксплуатационного этапа на более детальные этапы.

Этапы во времени могут частично перекрывать друг друга. Неоднозначность выделения этапов, стадий или фаз жизненного цикла обусловлена многообразием самих систем, множественностью их целевого назначения, способов их производства и т. д.

### 8.1.1. Управление процессом становления и развития ОТС

Цель управления заключается в том, чтобы обеспечить наибольшую эффективность использования сил и средств при решении поставленной задачи на каждом этапе жизненного цикла системы.

**Задачи**, решаемые на каждом этапе, должны быть достаточно строго согласованы с глобальной целью, для достижения которой создается система.



Рис. 8.3. Декомпозиция эксплуатационного этапа

Основой согласования задач и целей каждого этапа жизненного цикла с общей целью являются исследования эффективности операции, направленные на достижение этой глобальной цели.

*Оценка эффективности операции* служит также средством выработки и принятия решений на каждом этапе жизненного цикла, что в свою очередь является основой управления процессом становления и развития технической системы (ТС).

Исследования эффективности ТС на этапах жизненного цикла организуются в соответствии с общей схемой исследований (см. рис. 6.4, раздел 6).

*Этап НИР* является начальным этапом жизненного цикла ТС. На этом этапе осуществляется проблемный анализ в форме:

- поисковых НИР (при поиске возможных путей решения проблемы);

- целевых НИР, в рамках которых могут быть организованы *фундаментальные* и *прикладные* исследования, направленные на обоснование рационального выбора средств достижения цели в операции.

*Прикладные исследования* заканчиваются формированием предварительных требований к системе и разработкой технического задания.

## 8.1.2. Внешнее проектирование

На этом этапе формируется концепция системы в целом, т. е. способ понимания и представления ее основных функций, вырабатывается общий замысел системы и пути его реализации.

В системотехнике [48] этот этап называют системным проектированием. Стадии внешнего проектирования приведены на рис. 8.4.

Процесс внешнего проектирования имеет четыре стадии:

- определение цели проектирования;
- определение объекта проектирования;
- синтез математической модели объекта проектирования;
- формализация задачи проектирования.

На *первой* предварительной стадии анализируют связи проектируемой системы с внешней средой, прогнозируемые изменения внешней среды, устанавливается интенсивность этих связей, изучаются способы взаимодействий внешней среды с проектируемой системой. Для действующих систем оценивают рассогласования характеристик относительно их требуемых значений, соответствующих допустимому уровню эффективности этих систем.

Решение о разработке новой системы принимают при существенном снижении эффективности системы в прогнозируемых условиях обстановки.

После всестороннего обоснования и принятия решения о разработке перспективной системы формируют цели разработки и проводят их структуризацию.

Цели разработки тесно увязывают с той целью  $A_0$ , для достижения которой создается система.

В соответствии с принципом информационной достаточности модель системы может быть построена, если объём сведений (знаний) о системе не ниже некоторого предельно допустимого уровня.

Обычно объект проектирования определяют с целью получения сведений об этом объекте в объеме, превышающем минимальный уровень достаточности.

Сбор, структуризация и уточнение сведений (знаний) об объекте проектирования называют подготовкой данных для синтеза математической модели объекта.

Формирование математической модели проектируемой системы обычно начинают с разработки математического описания технической системы в виде набора проектных параметров и ограничений.

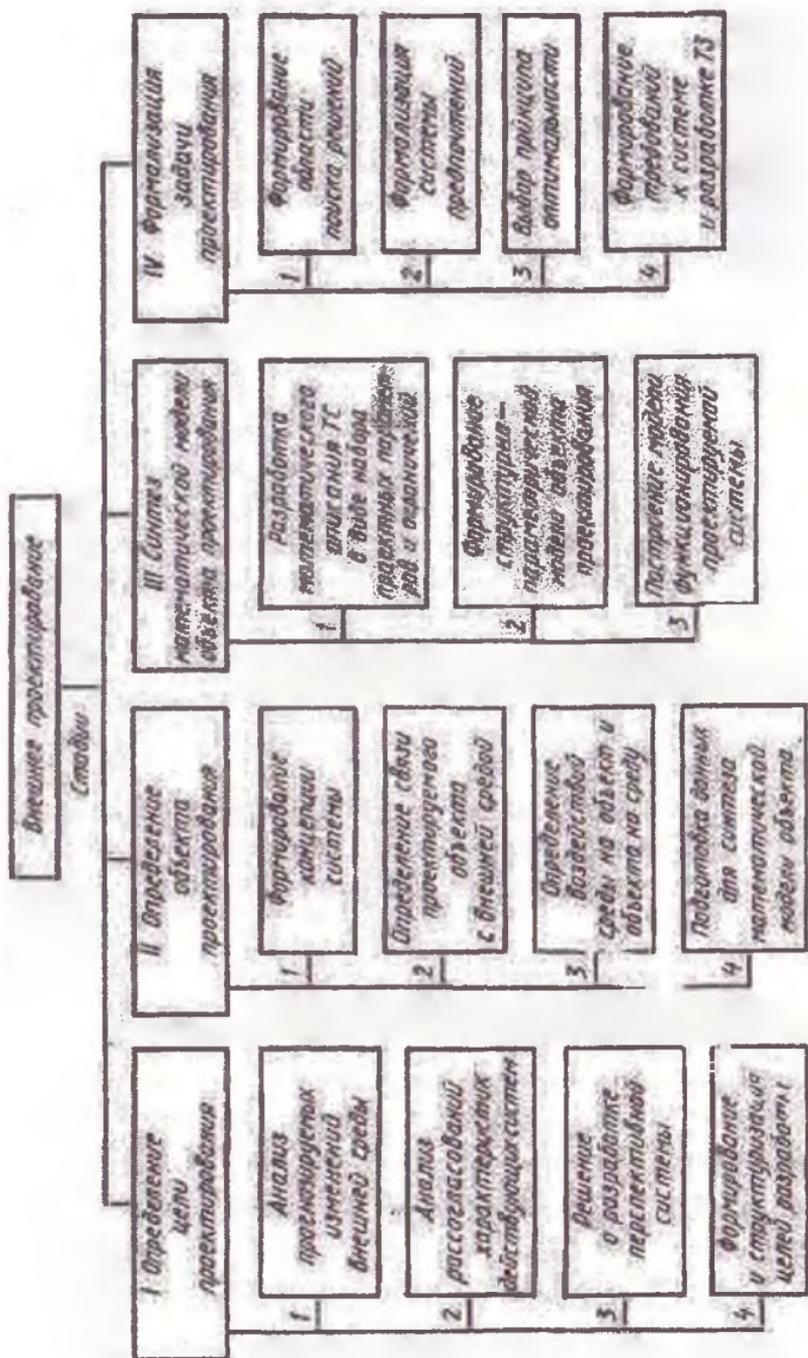


Рис. 8.4. Стадии внешнего проектирования

На основании такого описания строится структурно-параметрическая модель объекта проектирования, которая в общих чертах отражает облик проектируемой системы.

Формирование требований к системе и разработка технического задания являются целью внешнего проектирования ТС, за которой следует стадия определения объекта проектирования.

Внешнее проектирование заканчивается формированием рациональных требований к системе и разработкой технического задания.

Выбор рациональных требований к системе осуществляется на основе оценивания эффективности различных вариантов требований.

При оценивании эффективности вариантов на стадии внешнего проектирования необходимо по возможности проводить технико-экономическое обоснование каждого варианта.

### ***8.1.3. Внутреннее проектирование***

Создание рабочего проекта и разработка конструкторской документации есть цель внутреннего проектирования, а конкретное проектирование элементов, агрегатов и подсистем в системотехнике называют внутренним проектированием. Основными стадиями внутреннего проектирования являются предварительное, эскизное и рабочее проектирование. Стадии внутреннего проектирования приведены на рис. 8.5.

Изготовление и доводка опытного образца также являются стадией внутреннего проектирования, которое заканчивается принятием решения о серийном производстве системы (или ее элементов).

## **8.2. Описание обобщённой операции**

Методология системного анализа рекомендует рассматривать весь процесс создания и использования технической системы в рамках единого подхода. Следуя этим рекомендациям, целесообразно ввести понятие обобщённой (укрупненной)  $S_{00}$  – системы, в пределах которой реализуется обобщенная операция (ОО), имеющая два последовательных периода:

1-й период – создание технической системы (реализационный период);

2-й период – использование созданной технической системы в качестве активного средства для достижения цели  $A_0$  операции (период полезной жизни системы).

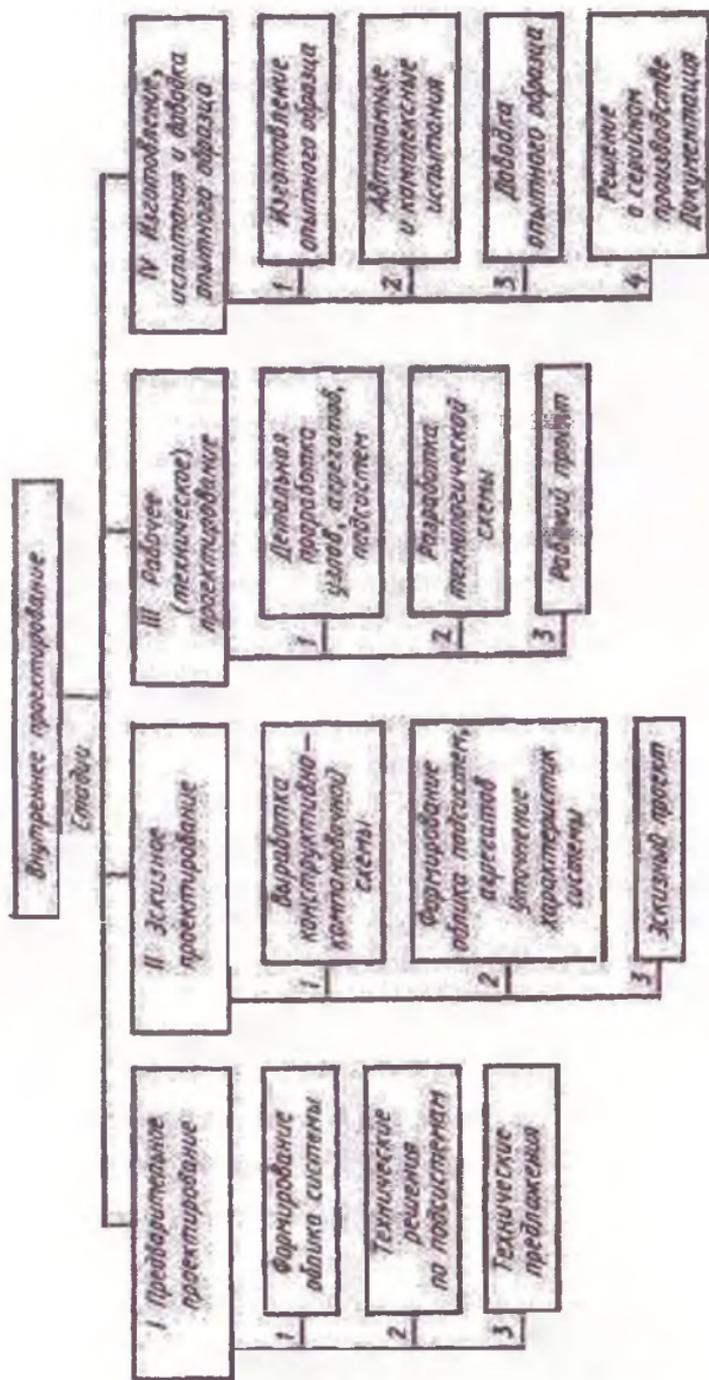


Рис. 8.5. Стадии внутреннего проектирования

### 8.2.1. Упрощенное описание задачи

Для решения возникшей проблемы необходимо достичь цель  $A_0$ .

**Исходные данные.** Активных средств достижения этой цели нет. Однако выделены (или могут быть выделены) материальные средства для разработки и производства технической системы, использование которой в операции в качестве активного средства дает возможность решать поставленную задачу, т. е. достичь цель.

**Требуется** выбрать рациональный вариант технической системы, спроектировать и организовать процесс её производства в соответствующие сроки так, чтобы потенциальная эффективность этой технической системы в операции, направленной на достижение цели, была по возможности наибольшей.

Таким образом, в обобщенной  $S_{00}$ -системе для достижения цели  $A_0$  в качестве активных средств используют выделенные денежные ассигнования на создание и развитие перспективной технической системы, силы и средства проектно-конструкторских организаций и производственных объединений.

Способы использования этих активных средств составляют **множество стратегий первого периода** обобщенной операции.

**Стратегиями второго периода** операции являются способы использования активных средств, в состав которых входит созданная в первом периоде операции сложная техническая система.

### 8.2.2. Согласование целей и задач

Описанная методологическая схема, основой которой является обобщенная  $S_{00}$ -система, позволяет обоснованно подойти к согласованию целей и задач каждого этапа жизненного цикла сложной технической системы.

Цель  $A_0$  обобщенной операции определяет назначение проектируемой системы и может быть реализована на этапе использования СТС.

Цели предшествующих этапов жизненного цикла являются промежуточными целями обобщенной операции.

Таким образом, этапы жизненного цикла системы являются этапами обобщённой операции, направленной на достижение цели  $A_0$ , и формируются в результате декомпозиции последней.

Способ декомпозиции обобщенной операции зависит от масштабов решаемой проблемы, сложности создаваемой технической системы, качества сил и средств, привлекаемых для её создания, становления и развития, а также от других факторов.

На стадии поисковых НИР формируется множество альтернативных потенциальных целей  $\alpha_0 = \{A_0^1, A_0^2, \dots, A_0^M\}$ .

Полагают, что достижение любой из этих целей решает возникшую проблему. Каждая альтернативная цель связана с определённой предметной областью.

Например, сбивать баллистические ракеты противника можно антиракетой, лазерным лучом, используя ядерное оружие или, наконец, запустив в космос множество техногенных частиц, от столкновения с которыми ракеты разрушатся.

Поисковая НИР организуется в форме проблемного анализа, предваряющего концептуальные исследования эффективности, направленные на обоснование и выбор цели  $A_0$  из множества  $\alpha_0$ , а также средств её достижения.

Выбранная глобальная цель  $A_0$  порождает множество локальных, частных целей и задач, которые играют роль средств достижения глобальной цели.

Исследования целевых НИР направлены на формирование упорядоченности частных целей и задач, установление способов и средств их достижения.

Определение множества частных целей и их упорядочение представляют собой процесс формирования программы достижения глобальной цели  $A_0$ .

Неопределенность в выборе способов и средств достижения частных целей и решения некоторых проблемных вопросов вынуждает иногда проводить фундаментальные исследования, результаты которых используют затем в прикладных исследованиях, формирующих теоретическую основу внешнего проектирования системы.

### 8.2.3. Граф целей и задач

Процесс формирования множества промежуточных целей и задач ведут обычно последовательно, начиная с анализа факторов, непосредственно влияющих на достижение глобальной цели  $A_0$ . При этом формируются промежуточные цели первого уровня. Затем выбирают цели второго уровня, достижение которых обуславливает выполнение целей первого уровня и так далее.

Множество промежуточных целей, приводящих к одной, удобно представить в виде ориентированного графа.

**Пример.** Пусть цель  $A_0$  состоит в снятии угрозы развёртывания противоракетной обороны (ПРО) условного противника при размещении элементов вблизи границы России (пример составлен на основе одного из выступлений бывшего президента Д.А.Медведева).

Промежуточными целями (задачами) являются:

В – создание реальной и надёжной ПРО России;

С – политическое давление на страны, создающие и размещающие ПРО вероятного противника;

Д – установка радиолокационных станций системы ПРО в Калининградской области;

Е – развёртывание в Калининградской области ракетного комплекса «Бук-1»;

Ф – создание и развёртывание более мощного ракетного комплекса «Бук-2».

Граф целей и задач приведён на рис. 8.6. Этот граф представляет собой взаимосвязи основной цели с промежуточными.

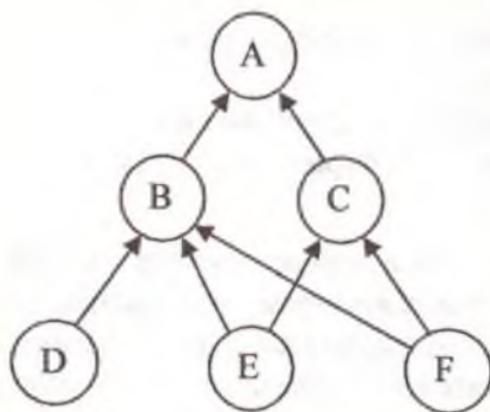


Рис. 8.6. Граф целей и задач

В общем случае, если глобальная цель или какая-либо из промежуточных целей может быть достигнута не единственным способом, то можно для решения такого рода задач использовать логико-вероятностные методы исследования надёжности структурно-сложных систем, основанные на операциях булевой алгебры. Эти методы позволяют формализовать процесс упорядочения целей и задач.

#### 8.2.4. Дерево целей

Для облегчения построения логических функций обычно используют так называемые деревья отказов или противоположные им по событиям деревья целей.

На рис. 8.7 представлено дерево целей, построенное на основе графа целей и задач, представленного на рис. 8.6. В этом дереве буквами обозначены соответствующие события. Треугольники со знаком «+» обозначают логическое сложение (дизъюнкцию), а со знаком «·» - логическое умножение (конъюнкцию).

С помощью этого дерева составляется логическая функция достижения цели.



Рис. 8.7. Дерево целей

Для этого сначала составим логическую функцию первого уровня с учётом событий второго уровня:

$$A_0 = B \vee C,$$

где  $B$  и  $C$  – первая и вторая цели второго уровня.

Логические функции второго уровня с учётом событий третьего уровня будут выглядеть так:

$$B = D \wedge E \wedge F \text{ и } C = D \wedge E.$$

Для упрощения записи знак конъюнкции « $\wedge$ » можно опускать, т. е.  $B = DEF$  и  $C = DE$ .

Подставляя эти равенства в логическую функцию первого уровня  $A_0$ , получим логическую функцию достижения цели с учётом всех уровней:

$$A_0 = DEF \vee DE. \quad (8.1)$$

### 8.2.5. Количественная оценка достижения цели

Пусть анализ показал, что вероятности базовых событий ( $D$ ,  $E$  и  $F$ ) для достижения цели  $A_0$  следующие:

$$P_D = 1, \quad P_E = 0,5 \text{ и } P_F = 0,1.$$

Требуется оценить вероятность достижения цели.

Используя математический аппарат логики-вероятностных функций, проводим преобразования в следующей последовательности:

$$A_0 = DEF \vee DE = DE(F \vee 1) = DE \cdot 1 = DE.$$

Переходим от логической функции к вероятностной:

$$P(A_0) = P(DE) = P(D)P(E) = P_D P_E.$$

С учётом принятых вероятностей базовых событий получаем вероятность достижения цели:

$$P(A_0) = 1 \cdot 0,5 = 0,5.$$

Сравним результат с вероятностью достижения цели без политического воздействия:

$$P(A_0) = P(B) = P(D)P(E)P(F) = P_D P_E P_F = 1 \cdot 0,5 \cdot 0,1 = 0,05.$$

Для более сложных систем аналитические преобразования становятся громоздкими. Поэтому применяют другие методы перехода от логических функций к вероятностным, например, с помощью преобразования логических функций к совершенной дизъюнктивной нормальной форме. Покажем этот метод на нашем примере.

Приведём функцию алгебры логики (8.1) к совершенной дизъюнктивной нормальной форме [31]:

$$A_0 = DEF \vee DE = DEF \vee DE(F \vee F') =$$

$$= DEF \vee DEF \vee DEF'.$$

Видно, что первая и вторая элементарные конъюнкции одинаковы. После удаления одной из них, получаем

$$A_0 = DEF \vee DEF'.$$

Анализируя полученное выражение, приходим к выводу, что оно стоит в совершенной дизъюнктивной нормальной форме. Поэтому можно перейти к вероятностной функции методом замещения, а именно, события заменить их вероятностями, знаки дизъюнкций и конъюнкций – знаками алгебраического сложения и умножения соответственно. В результате получим вероятностную функцию

$$A_0 = P_D P_E P_F + P_D P_E (1 - P_F).$$

После упрощений получаем

$$P_{A_0} = P(A_0) = P_D P_E P_F + P_D P_E - P_D P_E P_F = P_D P_E.$$

Формула, полученная этим методом, совпадает с формулой, полученной с помощью аналитических преобразований.

Данный метод можно применять к более сложным функциям.

По таким функциям можно определять вероятности достижения глобальной цели в зависимости от вероятностей достижения целей на самом низком иерархическом уровне рассматриваемой задачи (с учетом отнесения групп целей и задач к тому или иному этапу жизненного цикла системы).

### 8.2.6. Структурная схема $S_0$ -системы

Структурно-параметрическая модель является основой построения модели функционирования  $S_0$ -системы, в рамках которой проводится операция, направленная на достижение конечной цели  $A_0$ .

Вычленение  $S_0$ -системы и построение её функциональной модели являются определяющей стадией внешнего (системного) проектирования технической системы.

На рис. 8.8 представлена структурная схема  $S_0$ -системы. На схеме показаны основные компоненты  $S_0$ -системы: управляющая система  $S_B^u$ ; активные средства  $S_B^z$  и потребляющая система  $S_A$  (или объект воздействия). На схеме также показана руководящая система,

которая входит в состав метасистемы и по отношению к  $S_0$ -системе осуществляет функции целеполагания и координации.

Управляющая система  $S_B^u$  содержит управляющий орган (лицо, принимающее решения) и средства управления (включая каналы связи). Активные средства  $S_B^z$  обычно представляют собой некоторую операционную систему, перерабатывающую ресурсы с целью получения некоторого полезного эффекта при взаимодействии с потребляющей системой. Операционную систему может обслуживать персонал.

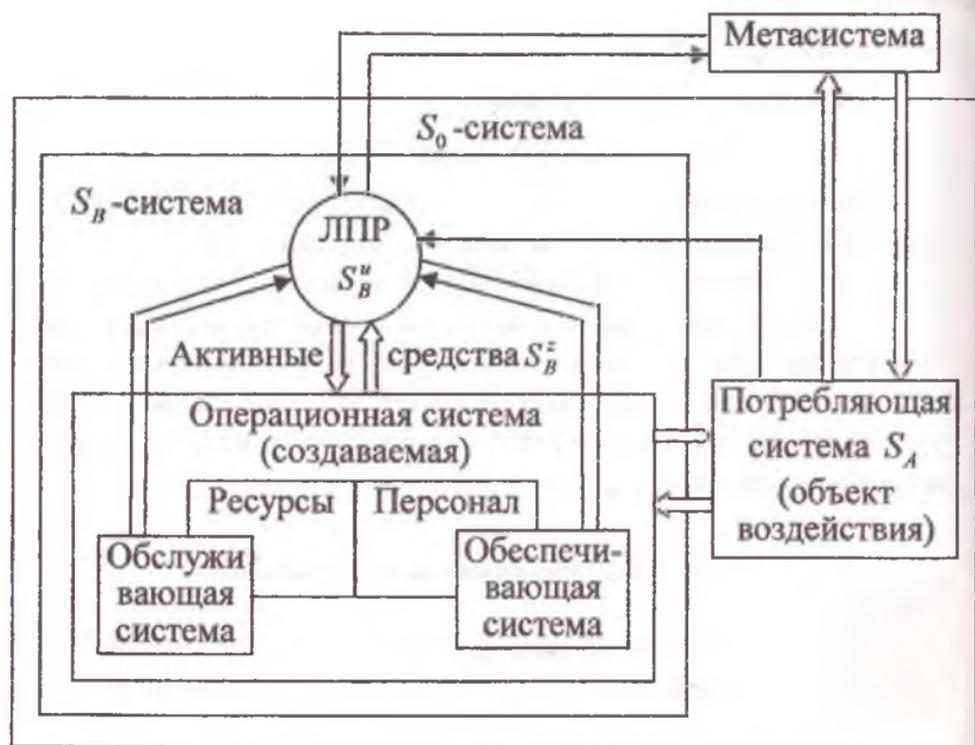


Рис. 8.8. Структурная схема  $S_0$ -системы

Кроме того, в состав активных средств могут быть включены обслуживающая и обеспечивающая системы.

Первая предназначена для поддержания заданного режима работоспособности операционной системы; вторая предназначена для реализации условий, необходимых для нормального использования операционной системы.

Управляющая система  $S_B^u$  и активные средства  $S_B^z$  (управляемая система) в совокупности образуют технический комплекс  $S_B$ .

Потребляющая система  $S_A$  также может представлять собой технический комплекс со своим органом управления.

Объектом проектирования может быть технический комплекс  $S_B$  или активные средства  $S_B$ . Кроме того, часто в качестве объекта проектирования выступает либо операционная, либо обслуживающая, либо обеспечивающая системы.

В зависимости от выбора объекта проектирования устанавливается уровень его качества  $\pi = \{R, I, C, A, L\}$ .

Как правило,  $A$  – качество вводится в случае, если объектом проектирования является полный комплект активных средств в операции либо весь технический комплекс.

Если объектом проектирования является подсистема, входящая в  $S_B^z$  (операционная система, обслуживающая или обеспечивающая система), то обычно ограничиваются уровнями качества  $R, I$  или  $C$ .

Способность технической системы достигать цель операции ( $A$  – качество) выражается потенциальной эффективностью операции и характеризует качество активных средств как единой системы.

Однако если система является лишь частью активных средств, то её качество не может быть охарактеризовано способностью достигать цель операции. В этом случае её качество оценивают либо устойчивостью, либо помехоустойчивостью, либо управляемостью, но иногда удаётся провести декомпозицию операции так, что исследуемая система является полномасштабным активным средством в новой операции. Можно также ввести  $A$  – качество как характеристику этой системы, выражающую потенциальную эффективность этой новой операции.

Построение модели  $S_0$ -системы является основой формализации задачи проектирования.

Эта стадия внешнего проектирования системы включает формирование множества допустимых решений, формализацию системы предпочтений ЛПР и установление критерия эффективности на основе введенного показателя эффективности операции.

Такие исследования ведут на концептуальном уровне. При этом большое внимание должно быть уделено анализу априорной информации, способам её получения и обработки.

### 8.2.7. Схема обобщённой операции

Рациональные требования к системе на стадии внешнего проектирования приходится выбирать в условиях большой степени неопределённости ввиду того, что период использования проектируемой системы по назначению отдалён по времени иногда на довольно большой срок; система предпочтений заказчика на стадии внешнего проектирования ещё недостаточно чётко выявлена. Кроме того, множество целей и задач часто слабо структурировано, а множество допустимых стратегий на каждом этапе жизненного цикла достаточно велико и разнообразно.

По мере реализации (протекания) обобщённой операции степень неопределённости несколько уменьшается, так как часть неопределённых факторов становится определённой.

Например, на завершающей фазе внешнего проектирования становится известным перечень требований к системе, так как уже выбран вариант системы из множества допустимых вариантов.

Обозначим:  $U^H$  – множество допустимых стратегий на этапе НИР; соответственно  $U^O$ ,  $U^П$ ,  $U^И$  – множества стратегий на этапах ОКР, производства и использования системы.

Тогда множество допустимых стратегий в обобщенной операции можно представить в виде прямого произведения множества стратегий на всех этапах жизненного цикла, т. е.  $U = U^H \times U^O \times U^П \times U^И$ .

При завершении того или иного этапа число сомножителей в прямом произведении сокращается.

Управляемые на предыдущем этапе факторы становятся на следующем этапе определенными факторами, формирующими условия нового этапа обобщенной операции.

На рис. 8.9 приведена схема обобщенной операции, на которой показано постепенное сужение множества допустимых стратегий при переходе от одного этапа жизненного цикла к другому.

Множество определенных факторов  $\Lambda$  расширяется вследствие поступления информации о решениях, принимаемых на каждом этапе жизненного цикла системы. После каждого этапа жизненного цикла постепенно сокращается и объем системы  $S_{00}$ , реализующей обобщенную операцию. Системы  $S_{00}^H$ ,  $S_{00}^O$ ,  $S_{00}^П$ , реализующие соответствующие этапы обобщенной операции, на рис. 8.9 изображены частично пересекающимися прямоугольниками.

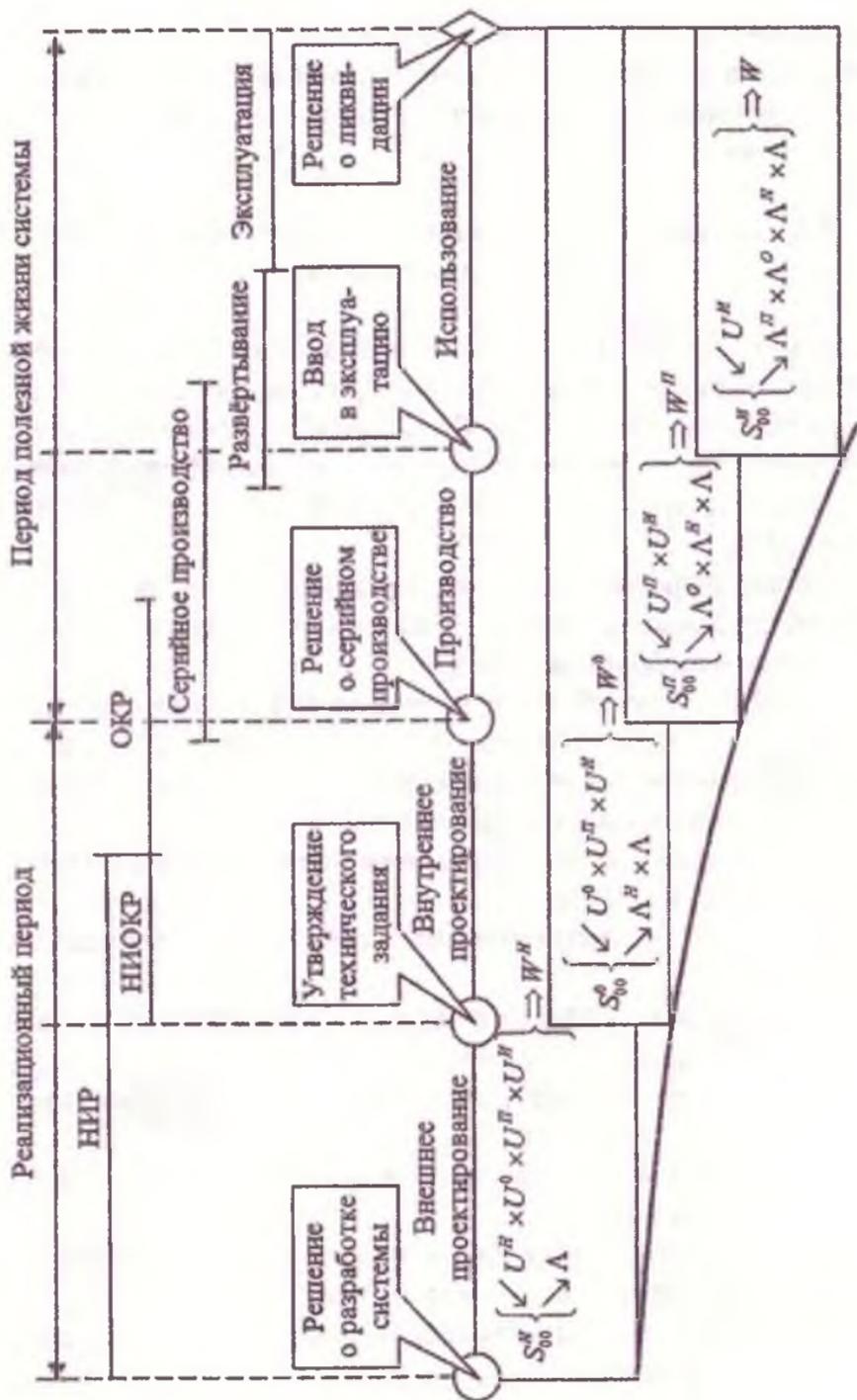


Рис. 8.9. Схема обобщённой операции

Высота такого прямоугольника условно показывает глубину проработки вопросов на соответствующем этапе, а сторона основания прямоугольника — широту охвата вопросов.

Кривая в нижней части схемы показывает, как увеличивается глубина проработки и сокращается широта охвата вопросов с течением времени.

### **8.3. Оценивание эффективности технической системы в период её создания**

Система обеспечения информацией должна быть спланирована на стадии внешнего проектирования. При планировании этой системы должны быть указаны способы получения информации по её видам на всех стадиях НИР и ОКР, порядок взаимодействий с заказчиком с целью получения от него требуемой информации в установленные сроки.

В состав информационной системы необходимо включить единый испытательный комплекс. Назначение последнего — организация системы испытаний, всех видов.

Единый испытательный комплекс (ЕИК) должен систематизировать все испытания, проводимые с системой и ее элементами, объединять их в общую систему планирования испытаний (экспериментов) и обработки результатов испытаний.

ЕИК строится как общая информационная система испытаний, объединяющая в единую схему:

- поисковые экспериментальные исследования на стадии поисковых НИР;

- лабораторные эксперименты на стадии целевых фундаментальных и прикладных исследований;

- экспериментальную проверку гипотез на стадии внешнего и внутреннего проектирования;

- автономные и комплексные заводские испытания элементов, агрегатов и подсистем;

- контрольные и приёмочные испытания опытного образца системы; эксплуатационные испытания системы;

- периодические испытания технической системы и её элементов в период эксплуатации.

Жизненный цикл системы отражается *поэтапным развитием обобщенной операции* как процесс постепенного накопления ин-

формации о свойствах создаваемой технической системы, условиях обстановки и способах её использования в качестве активного средства в операции.

По мере накопления информации о системе уточняется оценка эффективности операции, что приводит к более полному обоснованию принимаемых решений на каждом этапе жизненного цикла системы.

На стадии внешнего проектирования выбор рациональных требований к системе осуществляется на основе достаточно общих критериев эффективности, не приводящих к слишком сильному усечению (сужению) множества допустимых стратегий. На этой стадии *использование принципа оптимизации*, приводящего к выбору небольшого числа оптимальных стратегий (или всего одной стратегии), *не всегда оправданно*, так как на ранних этапах жизненного цикла проследить ход развития операции во всех деталях нельзя.

На стадиях внешнего и внутреннего проектирования целесообразно организовать последовательный обмен информацией между представителями данных стадий проектирования. Обмен информацией может происходить по определённой схеме.

1. Лицо, принимающее решения на стадии внешнего проектирования (ЛПР<sub>Н</sub>), осуществляет выбор определенного подмножества  $U_N^*$ , т. е. выбирает несколько вариантов требований к системе, пользуясь в основном критерием пригодности.

Эти варианты вместе с частными показателями эффективности ЛПР<sub>Н</sub> сообщает лицу, принимающему решения на стадии внутреннего проектирования (ЛПР<sub>0</sub>). Вектор частных показателей отражает систему предпочтений заказчика.

2. Лицо, принимающее решения на стадии внутреннего проектирования (ЛПР<sub>0</sub>), формирует ряд альтернативных вариантов  $U_0^*$  будущей системы в соответствии с вариантами требования ЛПР<sub>Н</sub>.

Каждый вариант рассматривается на стадии предварительного проектирования.

На этой стадии формируется облик системы и вырабатываются технические предложения, исходя из оценки эффективности каждого варианта системы.

3. Информация о проведённых исследованиях эффективности каждого варианта облика системы передается ЛПР<sub>Н</sub> для более полного оценивания эффективности системы в рамках уточнённой математической модели функционирования проектируемой системы.

4. После нескольких циклов обмена информацией между ЛПР<sub>Н</sub> и ЛПР<sub>О</sub> выбранный вариант  $u^* \in U_N^* U_O^*$  всесторонне анализируется с целью удовлетворения требований заказчика.

Оценка потенциальной эффективности проектируемой системы служит основой согласования требований заказчика с предлагаемыми характеристиками системы.

В процессе согласования варианта системы по мере обмена информацией между ЛПР<sub>Н</sub> и ЛПР<sub>О</sub> может меняться (усиливаться) принцип выбора и соответственно критерий эффективности.

Выбранные рациональные варианты технической системы оценивают затем на этапе серийного производства.

Выбирают способ производства системы, при котором будут выдержаны требуемые характеристики.

Соответствие полученных характеристик требуемым и допустимость некоторых отклонений устанавливаются оценкой эффективности системы, проводимым на основе результатов приёмочных испытаний. При этом критерий эффективности выбирают обычно таким же, каким пользуются при выборе рациональных стратегий на этапе использования технической системы.

### Контрольные вопросы

1. Приведите основные этапы жизненного цикла сложных технических и организационно-технических систем.

2. Расскажите об управлении процессом становления и развития организационно-технических систем.

3. Какие вопросы решаются на этапах внешнего и внутреннего проектирования?

4. Приведите описание обобщенной операции.

5. Расскажите о согласовании целей и задач.

6. Приведите пример дерева целей.

7. Каким образом осуществляется количественная оценка достижения цели (вероятности достижения цели)?

8. Приведите структурную схему  $S_0$ -системы.

9. Приведите схему обобщенной операции и расскажите о входящих в неё элементах.

10. Расскажите об оценивании эффективности технической системы в период её создания.

## 9. ОЦЕНИВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАЦИЙ

### 9.1. Содержание задачи оценивания эффективности

#### 9.1.1. Этапы оценивания эффективности

Процесс исследования эффективности операции независимо от того, на каком системном или методологическом уровне она рассматривается, может быть представлен в виде трёх этапов:

- постановка задачи;
- получение результатов;
- анализ результатов.

Формальная постановка задачи является результатом анализа проблемной ситуации. Данные вопросы рассматривались в разделе 7.

Второй этап - процесс *получения результатов*, часто называют этапом **оценивания эффективности операции** ОТС. Этот этап связан с формированием модели операции (механизма ситуации) и получением оценок эффективности по результатам моделирования.

Третий этап процесса исследования эффективности операции - процесс *анализа результатов* предполагает решение задачи выбора на основе сформированного критерия эффективности или системы таких критериев. Этот этап направлен на решение задачи выбора стратегий из множества  $U$  допустимых стратегий или задачи оценки эффективности.

Поскольку вторую задачу можно трактовать как частный случай задачи выбора, когда множество  $U$  выбора содержит только один элемент, то в дальнейшем остановимся на решении только второй задачи.

Напомним, что основой для введения количественных оценок эффективности операции служит понятие показателя эффективности  $W$  как меры степени соответствия реального (прогнозируемого или полученного) результата  $Y$  операции требуемому  $Y^{mp}$ , или степени достижения цели  $A_0$  операции, отображаемой требуемым результатом  $Y^{mp}$ .

Суть задачи оценивания эффективности состоит в измерении (количественном оценивании) уровня эффективности операции, т. е. в вычислении значения в общем случае векторного показателя эффективности  $W = (W_1, W_2, \dots, W_m)$ , где  $W_i, i = \overline{1, m}$  – частные показатели эффективности операции.

Результатом решения этой задачи являются векторные числовые оценки  $W(u)$ , полученные для всех стратегий и из рассматриваемого множества  $U$  допустимых стратегий.

Каждая такая оценка  $W(u)$  характеризует уровень эффективности (степень достижения цели) операции при данной стратегии  $u \in U$ .

Содержание задачи оценивания эффективности операции определяют следующие основные процедуры:

- построение математической модели операции и её машинная реализация;
- оценка качества модели и планирование экспериментов с ней;
- вычисление значений  $W(u)$  показателя эффективности  $W$  для всех стратегий  $u \in U$  с использованием модели.

Если рассматривать оценивание эффективности операции как процесс выполнения указанных процедур, то видно, что в основе его лежит математическое моделирование операции.

### 9.1.2. Задача оценивания эффективности операции

В общем виде задачу оценивания эффективности операции можно представить формальной записью следующего вида:

$$W(u) = M \left\{ \rho [Y(u), Y^{mp}] \right\}; \quad (9.1)$$

$$\Psi : \left\{ Y | H : U \times \Lambda \xrightarrow{\theta} Y(G) \right\} \xrightarrow{\theta} W, \quad (9.2)$$

где  $\Lambda$  – множество определённых и неопределённых факторов, формирующих обстановку операции;

$Y^{mp}$  – требуемый результат операции;

$Y$  – результат операции (вектор характеристик исхода  $g \in G$  операции, важных для достижения цели  $A_0$  операции, отображаемый требуемым результатом  $Y^{mp}$ );

$M$  – знак математического ожидания;

$\rho$  – функция соответствия;

$H$  – модель результата операции, позволяющая вычислить значения  $Y(u)$  результата  $Y$  операции для каждой стратегии  $u \in U$ ;

$\theta$  – информация о проблемной ситуации.

Отображение  $\Psi$  в (9.2) является отображением множества  $U$  допустимых стратегий во множество значений показателя эффективности  $W$  с учетом (9.1) и обычно задается в форме определённой математической модели операции.

Приведенная формальная запись задачи оценивания эффективности операции задает в наиболее общем виде (9.2) модель операции с оператором выхода  $W$  в форме (9.1).

Никаких ограничений на характер компонент модель (9.2) не накладывает и поэтому может использоваться как общая исходная основа для моделирования операций произвольной природы, назначения и сложности.

### 9.1.3. Структурная схема модели операции и её описание

Структурная схема модели (9.2) операции представлена на рис. 9.1.

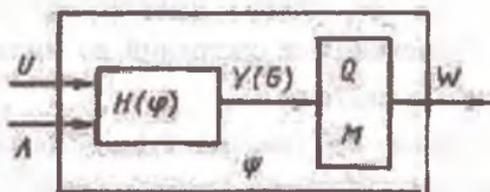


Рис. 9.1. Структурная схема модели операции

На схеме приведены основные операторы, с использованием которых множество  $U \times \Lambda$  входных воздействий отображается во множество значений показателя эффективности  $W$ .

Как следует из схемы, модель операции  $\Psi : U \times \Lambda \rightarrow W$  представляет собой составной оператор  $\Psi = H \otimes Q \otimes M$  оценивания эффективности операции, который является суперпозицией ( $\otimes$ ) операторов  $H$ ,  $Q$  и  $M$ .

Модель  $H : U \times \Lambda \rightarrow Y(G)$  в (9.2) представляет собой одну из форм оператора  $H$  моделирования результата (исхода) операции, которая может задаваться в функциональном или алгоритмическом виде и иметь различную математическую структуру.

Операторы  $Q$  и  $M$  отображают множество  $Y$  результатов операции во множество значений показателя эффективности  $W$ .

При этом множество  $Y$  с использованием оператора соответствия  $Q: Y \times Y^{mp} \rightarrow \rho$  отображается во множество значений функции соответствия  $\rho$ , а оператор усреднения  $M: \rho \rightarrow W$  переводит множество значений функции соответствия  $\rho$  во множество значений показателя эффективности  $W$ , т. е.  $Q \otimes M: Y \rightarrow W$ .

Суперпозиция операторов  $Q \otimes M$  определяет соответствие принятого показателя эффективности  $W$  цели  $A_0$  операции, отображаемой требуемым результатом  $Y^{mp}$ .

Конкретный вид оператора  $Q \otimes M$  зависит от постановки задачи исследования эффективности операции, характера множества  $\Lambda$  факторов и связей между ними, учитываемых при оценивании эффективности.

Как уже отмечалось, операция формируется в рамках  $S_0$ -системы, реализующей эту операцию, и поэтому в общем случае может рассматриваться как процесс функционирования  $S_0$ -системы, т. е. как процесс изменения ее состояний во множестве  $Z$  всех возможных состояний  $S_0$ -системы.

Тогда операторы  $\varphi$  и  $H$  (см. рис. 9.1), которые называют операторами перехода и выхода соответственно, могут быть символически записаны в виде соответствий:

$$\varphi: Z \times U \times T \times \Lambda \rightarrow Z \text{ (оператор перехода);}$$

$$H: Z \times U \times T \times \Lambda \rightarrow Y(G) \text{ (оператор выхода).}$$

В общем случае, когда конкретные свойства моделируемой операции не заданы, к операторам  $\varphi$  и  $H$  можно предъявить только одно требование: они должны давать возможность определять траектории  $Z_T$  и  $Y_T$  целиком, а также любые фрагменты этих траекторий.

Каждая точка траектории  $Z_T$  состояний  $S_0$ -системы и траектории  $Y_T$  результата операции характеризует для некоторого момента времени  $t \in T$  состояние  $Z_t$  системы и значение  $Y_t$  результата операции.

Конкретный вид обеих траекторий определяется множеством значений входных воздействий, реализованных за период функционирования  $S_0$ -системы (все или некоторые составляющие  $U$  и  $\Lambda$  входа могут зависеть от времени  $t \in T$ ), начальным состоянием  $Z_0$  системы и операторами  $\varphi$  и  $H$ .

Свойства операторов  $\varphi$  и  $H$  представляют исследователю определённую свободу действия: информацию о входных воздействиях  $U \times \Lambda$  он может использовать для прогнозирования как результата  $Y$  операции, так и состояния  $S_0$ -системы (или, например, технической системы, используемой в данной операции), причем (и это очень важно) в любой момент  $t \in T$  можно переключиться с решения первой задачи на решение второй или решать их одновременно.

Для многих реальных операций с использованием технических систем цель формируется в виде достижения этой системой некоторого требуемого состояния или одного из подмножества требуемых состояний из множества возможных.

Таким образом, структурная схема модели (9.2) операции (см. рис. 9.1) и её описание дают общее представление о характере и последовательности действий при построении математической модели операции.

#### ***9.1.4. Построение математической модели операции***

Получение значений показателей, характеризующих тот или иной исход операции, связано с решением задачи моделирования операции.

Исследователю, задавшемуся целью построить математическую модель конкретной операции, следует взять модель (9.2) за основу и, руководствуясь описанием структурной схемы (см. рис. 9.1), конкретизировать её компоненты в соответствии с поставленной задачей исследования, используя всю имеющуюся в его распоряжении информацию о данной проблемной ситуации.

Однако это лишь общая стратегия действий. В действительности процесс перехода от модели (9.2) к модели конкретной операции, т. е. собственно процесс построения модели операции является очень сложным и трудоёмким, особенно, когда речь идет об операциях, связанных с проектированием, созданием и применением больших технических систем.

Исходной информацией для построения математической модели операции служат качественные и количественные данные об элементах модели проблемной ситуации

$$\langle U, \Lambda, H, G, Y, \Psi, W, K, \varphi, \theta \rangle, \quad (9.3)$$

сформированные на этапе постановки задачи в результате переработки и преобразования всей имевшейся информации о решаемой проблеме.

Степень полноты и достоверности этих данных существенно влияет на процесс формализации, в ходе которого осуществляется переход от содержательного описания операции к ее математической модели.

Главное требование к модели – её адекватность исследуемой операции, иначе невозможно получить положительные результаты моделирования, т. е. оценивание эффективности операции на неадекватной модели вообще теряет смысл.

Модель считается адекватной, если с помощью неё можно получить результаты процесса функционирования  $S_0$ -системы, близкие к процессам в реальной исследуемой системе с достаточной степенью приближения (на уровне понимания исследователем моделируемой операции).

В процессе формализации исследователь должен определить, достаточно ли исходных данных об элементах проблемной ситуации (9.3) для построения адекватной модели.

Если имеющихся данных недостаточно, то исследователь должен разработать процедуры получения дополнительной информации и прежде всего о тех элементах проблемной ситуации (9.3), которые непосредственно фигурируют в (9.1) и (9.2).

Для получения любой информации требуются затраты времени и средств. Поэтому необходимость в дополнительной информации, должна каждый раз тщательно обосновываться.

При получении новой информации о моделируемой операции из внешних источников или из результатов моделирования её модель пересматривается и уточняется с учетом новой информации, т. е. процесс моделирования, включая разработку и машинную реализацию модели, является итерационным.

Этот итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет построена такая модель, которую по мнению ЛПР и исследователя можно считать адекватной реальной операции в рамках поставленной задачи исследования эффективности операции (технической системы).

## **Блочный принцип построения моделей**

При оценивании эффективности крупномасштабных операций и сложных технических систем их модели рационально строить по блочному принципу. Каждый из этих блоков достаточно автономен, что выражается минимальным числом связей между ними.

Поведение этих блоков должно быть хорошо изучено и для каждого из них построена математическая модель, которая в свою очередь может содержать подблоки.

## **Типы моделей**

Построение математической модели связано с выбором типа модели (аналитическая, статистическая, имитационная) в зависимости от цели и уровня (системного, методологического) исследования эффективности, необходимой точности и достоверности результатов оценивания, отведенного времени на исследование и т. д.

Сформированная математическая модель операции воплощается затем в конкретную машинную модель, разработка которой предполагает:

- алгоритмизацию модели,
- выбор языка моделирования,
- программирование модели,
- проверку достоверности программы.

Перед проведением рабочих расчетов на ЭВМ по составленной и отлаженной программе нужно оценить качество модели и при необходимости принять меры по его повышению.

### ***9.1.5. Планирование экспериментов на компьютере***

Выполнение рабочих расчетов на ЭВМ осуществляется в соответствии с планом проведения эксперимента, в котором должны быть указаны комбинации переменных и параметров, для которых должно проводиться моделирование операции.

Планирование машинного эксперимента в конечном итоге направлено на получение максимального объема необходимой информации о моделируемой операции при фиксированных затратах машинных ресурсов.

Планирование экспериментов имеет особое значение при проведении рабочих расчетов с использованием статистических и особенно имитационных моделей.

**Заключительная процедура этапа оценивания эффективности операции** — вычисление с использованием машинной модели значений  $W(u)$  показателя эффективности  $W$  для всех допустимых стратегий  $u \in U$ .

Этим завершается этап получения результатов.

Рассмотренные положения задают общую схему оценивания эффективности операций (технических систем).

В дальнейшем раскрываются наиболее важные составляющие этой схемы, необходимые для решения практических задач исследования эффективности операций с использованием технических систем.

## 9.2. Основные методы моделирования

При исследовании эффективности СТС моделирование часто является единственно возможным подходом к их изучению.

Концепция моделирования предполагает формирование некоторого условного образа (аналога) реальной системы и изучение его свойств с целью получения информации о реальной системе [65].

Этот образ реальной системы называют моделью.

Однако по сравнению с реальной системой (оригиналом) модель может иметь совершенно иную природу. Между реальной системой и ее моделью должно быть установлено определенное соответствие (аналогия).

### 9.2.1. Классификация методов моделирования

Различают материальное (предметное) и идеальное моделирование (рис. 9.2).

В первом случае в качестве модели предполагается использование некоторого материального предмета. По природе аналогии материальное моделирование делят на физическое (макетирование, обеспечивающее аналогию физической природы оригинала и модели) и аналоговое (обеспечивающее сходство процессов, протекающих в оригинале и модели).

Идеальное моделирование основывается на мысленной идеализированной аналогии реального объекта и его модели, а по способу отражения реального объекта (или по глубине формализации) делится на знаковое (семиотическое) и интуитивное моделирование.

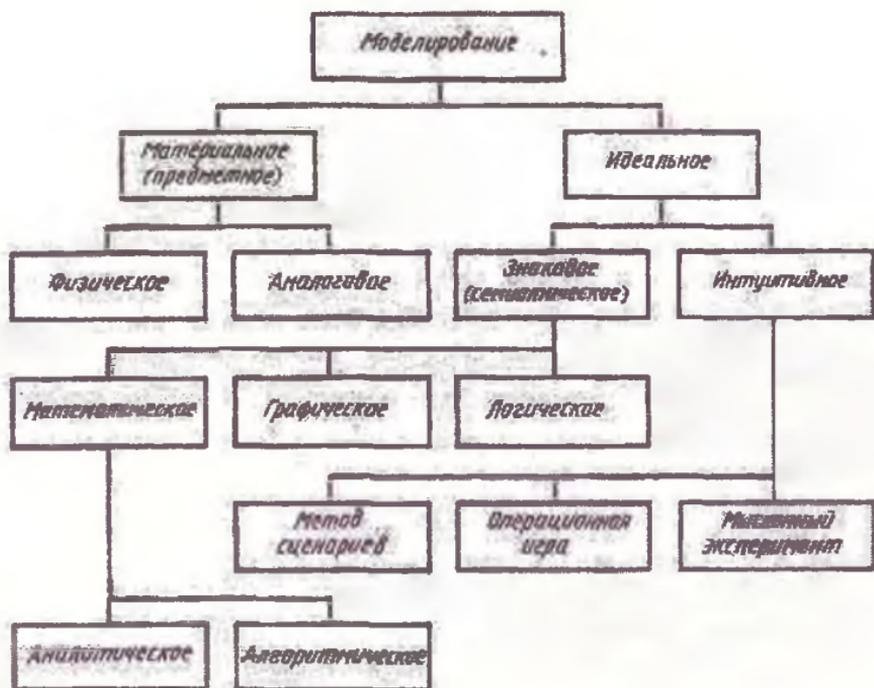


Рис. 9.2. Классификация методов моделирования

(Семиотика — теория знаковых систем.)

По способу представления семиотических моделей различают математическое и графическое моделирование.

По вычислимости различных показателей, отношений и т. п. методы математического моделирования делят на аналитические и алгоритмические.

*Аналитическое моделирование* предполагает использование математической модели реального объекта в форме алгебраических, дифференциальных, интегральных и других уравнений, связывающих выходные переменные с входными, дополненными системой ограничений (в виде равенств или неравенств). При этом предполагается наличие однозначной вычислительной процедуры получения точного решения уравнений.

При *алгоритмическом подходе* используемая математическая модель не допускает точного решения и вынуждает обращаться к различным рекуррентным методам, итеративным процедурам поиска приближенного решения. Такой подход при моделировании сложных систем является типичным.

*Интуитивное* моделирование проводится на вербальном (описательном) уровне. При таком моделировании не устанавливают строгие количественные соотношения между моделируемыми явлениями, ограничиваясь лишь анализом качественных обобщенных понятий, отражающих общие тенденции развития явлений, направления изменения свойств изучаемых объектов и т. п. Такой подход осуществляется с целью выдвижения различного рода гипотез поведения субъектов сложных систем, формирования эвристик относительно взаимоотношений между активными элементами системы и их развития.

По способу формирования эвристик различают следующие формы интуитивного моделирования: метод сценариев, операционные игры, мысленный эксперимент и др.

Интуитивное моделирование является основным методом моделирования деятельности метасистемы.

Аналитическое моделирование не ограничивается исследованием достаточно простых систем.

Концептуальные модели метасистемы часто представляют в аналитическом виде, учитывая лишь некоторые существенные связи и отношения между моделируемыми явлениями.

### ***9.2.2. Имитационное моделирование***

Основной формой системного анализа эффективности сложных технических систем является имитационное исследование, проводимое в рамках имитационных моделей. При этом стремятся к наиболее полному учету всех существенных факторов.

События при имитации разворачиваются во времени, как правило, в том порядке, в каком они следуют в реальной системе, но в измененной временной шкале.

Действие случайных факторов учитывается с помощью специальных датчиков случайных чисел (имитаторов), настроенных на соответствующие вероятностные распределения.

В определенном месте процесс имитации на ЭВМ может быть приостановлен для проведения, например, операционной игры, экспертного опроса или натурного эксперимента с использованием промежуточных данных, полученных при машинной имитации.

Результаты игры, экспертизы или эксперимента могут быть использованы для продолжения имитации на ЭВМ.

В имитационном моделировании используются практически все методы моделирования, отображенные на рис. 9.2.

Имитационное моделирование объединяет имитацию исследуемого явления и планирование имитационного эксперимента.

Важным достоинством имитационного моделирования является возможность фиксации промежуточных значений различных показателей в процессе имитации подобно тому, как это имеет место при съеме данных в процессе функционирования реальной системы.

### ***9.3. Принципы моделирования операций в технике***

Существуют определенные выработанные практикой **принципы моделирования**, придерживаясь которых осуществляют построение соответствующих моделей.

#### ***9.3.1. Принцип информационной достаточности***

При полном отсутствии информации об исследуемой системе построение её модели невозможно.

При наличии полной информации о системе её моделирование лишено смысла.

Существует некоторый критический уровень априорных сведений о системе (уровень информационной достаточности), при достижении которого в принципе можно получить адекватную модель системы.

Этот уровень определяется наличием информации об элементах системы и о существенных связях между ними, которые формируют эмерджентные (интегративные) свойства системы.

При отсутствии этих сведений моделирование не приведёт к получению новой информации о системе, т. е. окажется бесплодным.

В понятие информационной достаточности входят также сведения о полезности системы в деятельности метасистемы (внешнее дополнение). Без этих сведений моделирование лишено целенаправленности.

#### ***9.3.2. Принцип параметризации***

Некоторые относительно изолированные подсистемы характеризуются определенным параметром (возможно векторным).

Значения этого параметра могут зависеть от ситуаций, складывающихся в исследуемой системе.

Такие подсистемы в модели можно заменять соответствующим параметром, а не описывать процесс их функционирования.

Зависимость параметра от ситуаций в общей модели обычно задают в виде таблицы, графика или аналитического выражения (формулы).

**Пример.** Задание плотности атмосферы по таблицам стандартной атмосферы.

Принцип параметризации позволяет иногда в значительной мере сократить объём и продолжительность моделирования исследуемой системы.

Однако надо иметь в виду, что параметризация снижает адекватность модели и должна употребляться с известной осторожностью.

### 9.3.3. Принцип агрегирования

В большинстве случаев сложную систему можно структурно представить состоящей из агрегатов (подсистем), для адекватного математического описания которых оказываются пригодными некоторые стандартные математические схемы.

В качестве частных случаев общая динамическая система охватывает модели, описываемые системой дифференциальных уравнений, конечными и вероятностными автоматами, описываемые на основе теории систем массового обслуживания и т. п.

В единую имитационную модель агрегаты объединяются с помощью оператора сопряжения.

### 9.3.4. Принцип осуществимости

Создаваемая модель должна обеспечивать достижение поставленной цели исследования с вероятностью, существенно отличающейся от нуля, и за конечное время.

Обычно задают некоторое пороговое значение  $P_0$  вероятности достижения цели моделирования  $P_{ц}(t)$ , а также приемлемую границу  $\tau_0$  времени достижения этой цели  $\tau$ .

Считают модель осуществимой, если одновременно выполнены неравенства  $P_{ц}(t) \geq P_0$  и  $\tau \leq \tau_0$ .

При нарушении хотя бы одного из этих неравенств модель неосуществима.

### 9.3.5. Принцип рационального использования факторного пространства

Этот принцип является основным в статистической теории планирования экспериментов [18]. Имитационное моделирование предполагает планирование активного машинного эксперимента.

В пространстве управляемых переменных (в факторном пространстве) точки, отображающие условия экспериментов, следует выбирать в соответствии с определенным оптимальным планом эксперимента. В зависимости от цели исследований, априорной информации и других обстоятельств используют планы ортогональные, ротатабельные,  $D$ -оптимальные,  $Q$ -оптимальные и т. д. [18].

Суть планирования экспериментов приведём на примере двухфакторного эксперимента, который допускает геометрическую интерпретацию на плоскости, как это показано на рис. 9.3.

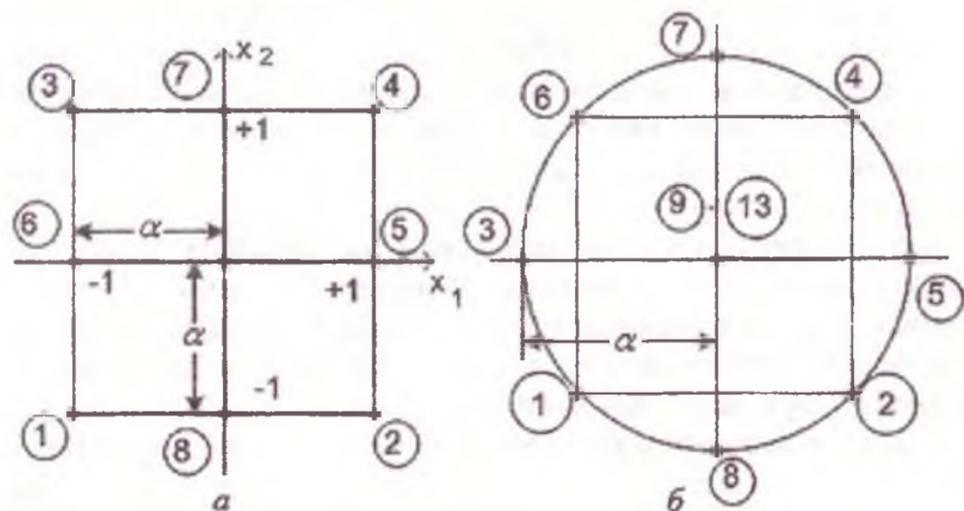


Рис. 9.3. Планы второго порядка:  
 $a$  – ортогональный;  $b$  – ротатабельный

Для линейных моделей уравнения регрессии (функции отклика) достаточно проводить эксперименты при минимальных и максимальных значениях факторов (из нормированной относительно единицы области определения). На рис. 9.3, $a$  это соответствует точкам 1, 2, 3 и 4. Это так называемые ортогональные планы.

Для нелинейных моделей к этим точкам добавляются дополнительные, которые по каждому направлению, включая диагональные, должны обеспечивать информацией в трёх точках двухфакторного

пространства, например 5, 6, 7, 8-я точка в центре квадрата (с так называемым нулевым уровнем факторов).

Если дополнительные точки берутся выше уровней, предусмотренных в ортогональном плане, например в точках 3, 5, 7 и 8, располагаемых на расстоянии радиуса описанной окружности  $\alpha$  вокруг нормированной области определения, как это показано на рис. 9.3,б, то такие планы называются ротатбельными.

Для трёхфакторного планирования экспериментов можно привести иллюстрацию на примере пространственных фигур. Для четырёхфакторного плана (и выше) геометрическую интерпретацию представить невозможно, однако суть планирования ясна.

При фиксированном числе опытов (реализаций) оптимальный план позволяет получать наибольший объем информации, полученной из ограниченного количества экспериментов.

План эксперимента также может выбираться ещё и с учётом минимизации чувствительности решения по отношению к случайным воздействиям. В качестве числовой характеристики чувствительности принимают некоторые из числовых характеристик ковариационной матрицы (рассчитанной по результатам оценок результатов наблюдения). В зависимости от этого получают ряд критериев оптимальности.

1. План называется *A*-оптимальным, если он минимизирует сумму квадратов главных полуосей эллипсоида рассеяния оценок. Известно, что при нормальном законе распределения результатов наблюдений поверхностями постоянных значений функции плотности распределения являются эллипсоиды.

2. План называется *D*-оптимальным, если он минимизирует величину определителя матрицы. Это соответствует минимизации обобщенной (осреднённой) дисперсии.

3. *E*-оптимальный план минимизирует максимальную ось эллипсоида рассеяния, что равносильно минимизации максимального собственного числа матрицы или минимизации максимального характеристического значения ковариационной матрицы уравнения регрессии.

4. *G*-оптимальный план обеспечивает наименьшую по всем планам максимальную величину дисперсии предсказанных значений функции отклика в области факторного эксперимента. Эти планы называют минимаксными.

Принцип рационального использования факторного пространства позволяет в значительной мере экономить время расчетов на мо-

делях. Более подробные сведения по планированию экспериментов можно почерпнуть в соответствующей литературе.

### 9.3.6. Принцип множественности моделей

Любая модель реальной системы учитывает не все факторы, действующие в системе.

Модель как средство отражения реального явления как бы усиливает действия одних факторов, ослабляя действия других.

При использовании любой конкретной модели познаются лишь некоторые стороны реальности.

Для более полного отражения действительности необходим ряд моделей («веер» моделей), позволяющий с разных сторон и с разной степенью детальности (в зависимости от цели исследования) отражать изучаемое явление.

Принцип множественности моделей может быть рационально реализован в имитационной системе, которая позволяет достаточно гибко подходить к формированию моделей операций, выполняемых исследуемой системой в различных ситуациях.

## 9.4. Классификация моделей оценивания эффективности

### 9.4.1. Статические и динамические модели

Модель называется *статической*, если множество возможных состояний моделируемой системы является единичным, т. е. содержит всего один элемент. Система не меняет своего состояния в течение времени и, следовательно, оператор перехода  $\varphi$  при формировании модели не рассматривается.

Если множество состояний системы неединично и состояния могут меняться во времени, то соответствующую модель называют *динамической*.

### 9.4.2. Дискретные и непрерывные модели

Динамические модели в зависимости от мощности множества состояний  $Z$  делят на модели с *дискретными* состояниями (множество состояний конечно или счётно, т. е. не более чем счётно) и модели с *непрерывным* множеством состояний (множество состояний

ставится во взаимно-однозначное соответствие множеству точек числового интервала, имеющего мощность континуума).

Не исключаются смешанные случаи дискретно-непрерывных множеств состояний.

Процесс смены состояний называют *движением системы*.

Смена состояний системы может происходить в фиксированные моменты времени, множество которых дискретно и заранее определено.

Такой процесс смены состояний называют последовательностью. Последовательности задают обычно разностными уравнениями.

Если множество моментов смены состояний системы непрерывно в пределах некоторого временного интервала, то процесс движения такой системы описывают обычно дифференциальными уравнениями.

### *9.4.3. Детерминированные и вероятностные модели*

Различают *детерминированные модели* (описывающие лишь причинно-следственные связи между различными факторами) и *вероятностные модели*.

Детерминированные модели описывают процесс смены состояний в виде зависимости вектора состояний  $Z$  от времени и других факторов.

Вероятностные модели отражают процесс движения системы в виде зависимости условной вероятности перехода в то или иное состояние системы от предшествующих состояний и других факторов.

Вероятностная модель может быть записана не только для условной вероятности состояний, но и для других характеристик распределения состояний (например, вероятностные модели с непрерывным временем обычно записывают в виде уравнений относительно интенсивностей переходов в различные состояния).

Вероятностные модели классифицируют обычно как случайные процессы, разделяя их на процессы с дискретным временем (случайные последовательности) и с непрерывным временем.

### *9.4.4. Статистические модели*

В классе стохастических моделей наряду с вероятностными выделяют также статистические модели.

Статистическая модель формируется по схеме эксперимента со случайным исходом.

Операторы выхода  $\varphi$  и перехода  $H$  включают в свой состав случайные факторы  $\Lambda_E$ . При этом случайное воздействие может подаваться на вход модели либо формироваться с помощью датчиков случайных переменных (имитаторов) в рамках самой модели.

Оператор  $H$  на выходе статистической модели формирует случайную переменную  $Y$ .

Операторы  $\varphi$  и  $H$  реализуются, как правило, в алгоритмической форме на ЭВМ. При этом сам процесс моделирования может быть назван машинным экспериментом.

Имитационная модель оценивания эффективности позволяет достаточно полно описать результат операции и, следовательно, дает возможность всесторонне подойти к анализу эффективности операций.

#### *9.4.5. Использование имитационных моделей*

Данный вид моделирования подробно обсуждался в п. 9.2.2. Здесь же отметим ещё раз, что при имитационном моделировании используются практически все методы моделирования, упомянутые в данном разделе.

#### **Контрольные вопросы**

1. Расскажите об этапах оценивания эффективности.
2. Приведите задачу оценивания эффективности операции.
3. Приведите структурную схему модели операции и опишите её.
4. Расскажите об организации планирования экспериментов на компьютере и оптимальных планах.
5. Приведите классификацию этапов и методов моделирования.
6. В чём состоит суть имитационного моделирования? Приведите достоинства и недостатки.
7. Расскажите о следующих принципах моделирования операций в технике:
  - информационной достаточности;
  - параметризации;
  - агрегирования;

- осуществимости;
- рационального использования факторного пространства;
- множественности моделей.

8. По каким признакам можно классифицировать модели? Охарактеризуйте следующие модели:

- статические и динамические;
- дискретные и непрерывные модели;
- детерминированные и вероятностные модели;
- статистические.

## 10. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И СХЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ

### 10.1. Математическое описание операции

#### 10.1.1. Состояние системы

Состояние  $S_0$ -системы определяется состояниями всех входящих в неё элементов.

В каждый момент времени система может находиться только в одном состоянии.

Состояние  $S_0$ -системы и внешней среды в определенный момент времени называют *ситуацией* или *обстановкой* операции.

Совокупность факторов, существенно влияющих на изменение обстановки (обуславливающих её), называют *условиями* обстановки.

#### 10.1.2. Функционирование системы

Функционирование системы есть процесс изменения ее состояний.

Процесс функционирования системы в общем случае может рассматриваться как процесс изменения её состояний во множестве  $Z$  всех возможных состояний.

Пусть  $Z_t$  – состояние  $S_0$ -системы в момент времени  $t$ . При этом  $z_t \in Z$ , где  $Z$  – множество всех возможных состояний системы (пространство состояний). В общем случае  $Z_t$  есть  $n$ -мерный вектор

$$z_t = \|z_{1t}, z_{2t}, \dots, z_{nt}\|.$$

Обозначим  $Z^t$  траекторию процесса смены состояний до момента  $t$ , т. е. при дискретном времени ( $t = 0, 1, 2, \dots$ )

$$z' = \{z_0, z_1, z_2, \dots, z_t\}. \quad (10.1)$$

Состояние  $z_t$   $S_0$ -системы к моменту  $t$  в общем случае зависит от траектории процесса до момента  $t$ , т. е. от истории процесса:

$$z_t = \{z', l \leq t\}.$$

Кроме того, состояние  $z_t$  зависит от всей совокупности управляющих воздействий на управляемые подсистемы, агрегаты, элементы  $S_0$ -системы со стороны ЛПР и других субъектов системы к моменту времени  $t$ , а также от воздействий внешних возмущающих факторов, часть из которых  $\Lambda_E$  имеет случайный характер, а другая часть может быть отнесена к природным и поведенческим неопределенностям  $\Lambda_J = \Lambda_J^N \cup \Lambda_J^B$ .

### 10.1.3. Входные параметры системы

Вход  $X$   $S_0$ -системы объединяет несколько составляющих:

- 1) стратегии ЛПР  $u^t \in U$ , где  $U$  – множество его допустимых стратегий;
- 2) стратегии других субъектов системы  $v^t \in V$ , где  $V$  – множество их допустимых стратегий ( $V = \Lambda_J^B$ );
- 3) случайные возмущения  $\Lambda_E$ ;
- 4) возмущающие воздействия нестохастического характера  $\Lambda_J^N$ , имеющие природную неопределенность.

Все перечисленные составляющие входа (или часть из них) могут зависеть от времени  $t \in T$ , где  $T$  – множество моментов времени.

В этом случае  $x(t) \in X$ , где  $X$  – множество всевозможных вектор-функций входа (функциональное пространство входных переменных).

### 10.1.4. Функция перехода и оператор перехода

Функция перехода записывается так:

$$z_t = \varphi_z(z^{t-1}, u^{t-1}, v^{t-1}, \lambda_E, \lambda_J^N), \quad (10.2)$$

где  $z^{t-1}$  — траектория процесса смены состояний до момента  $t$ ,  
 $(z^{t-1} = \{z_0, z_1, z_2, \dots, z_{t-1}\})$ ;

$u^{t-1}, v^{t-1}$  — совокупность управлений (стратегии) ЛПР и других  
субъектов системы до момента  $t$  ( $u^{t-1} = \{u_0, u_1, u_2, \dots, u_{t-1}\}$ ,  
 $v^{t-1} = \{v_0, v_1, v_2, \dots, v_{t-1}\}$ ) — значения возмущающих факторов.

### Оператор перехода

Символическая запись оператора (10.2) удобна в виде соответствия  
 $\varphi: Z \times U \times V \times T \times \Lambda \rightarrow Z$ , (10.3)

где  $\Lambda = \Lambda_F \cup \Lambda_E \cup \Lambda_J$ .

Эта запись означает, что система из состояния  $Z$  после управляющих воздействий  $U$  и  $V$ , а также в процессе изменения времени  $T$  и при влиянии случайных факторов  $\Lambda$  переходит в новое состояние  $Z$ .

Процесс  $z^t$  с учетом случайных возмущений  $\Lambda_E$  может быть случайным управляемым процессом  $\hat{z}^t$ . Для его измерения вводится пространство  $\langle Z, \Sigma_z \rangle$ , где  $\Sigma_z$  —  $\sigma$ -алгебра на множестве  $Z$ . На этом пространстве задаётся система условных вероятностных мер:

$$\left\{ \mu_t(\Sigma_z | z^{t-1}, u^{t-1}, v^{t-1}) = P(\hat{z}_t \in \Sigma_z | z^{t-1}, u^{t-1}, v^{t-1}); \quad \forall t \in T \right\}. \quad (10.4)$$

Процессы с непрерывным временем обычно описывают дифференциальными уравнениями

$$\dot{z} = \phi_z(z, u, v, \lambda_E, \lambda_J^N). \quad (10.5)$$

Управляемый дискретный процесс можно представить как некоторую многошаговую (позапную) процедуру принятия решений ЛПР (выбор стратегий) и другими субъектами системы.

В частном случае эта процедура может быть одношаговой, т. е. выбор стратегии может быть однократным.

### 10.1.5. Выбор стратегий

При поэтапном выборе стратегий на очередном шаге ЛПР выбирает стратегию, придерживаясь определенного правила рациональ-

ного поведения, в зависимости от состояний системы и управлений на предыдущих шагах процесса, т. е.

$$u(t) = \varphi_B(z^t, u^{t-1}, v^{t-1}). \quad (10.6)$$

Иногда приходится использовать рандомизированные стратегии (*рандомизация* – случайный выбор). В этом случае вводится некоторый искусственный механизм случайного выбора управления (частных стратегий). Рандомизированную стратегию определяют следующим образом. Пусть  $\langle U, \Sigma_u \rangle$  измеримое пространство с  $\sigma$ -алгеброй  $\Sigma_u$ . Условная вероятностная мера

$$v_t(\Sigma_u | z^{t-1}, u^{t-1}, v^{t-1}) = P(\hat{u}_t \in \Sigma_u | z^{t-1}, u^{t-1}, v^{t-1}). \quad (10.7)$$

Совокупность условных мер  $v^{t-1} (t=1, 2, \dots)$  называют *рандомизированной стратегией*.

Стратегии других субъектов системы (распорядительных центров) также могут быть рандомизированными.

Взаимоотношения между субъектами системы (включая ЛПР) определяют первичную структуру  $S_0$ -системы.

Субъекты между собой могут находиться в отношении строгого подчинения, образуя иерархическую централизованную структуру, нестрогого подчинения, отражаемого ромбовидной или матричной структурой, а также могут, не находясь в прямом подчинении, стимулировать желательные действия для себя со стороны другого субъекта путем поощрительных мероприятий, рефлексивного принуждения и т. д.

Кроме того, субъекты системы могут между собой конфликтовать. Конфликт может принять различные формы, от нестрогого соперничества до антагонизма.

### 10.1.6. Выход системы

Выход  $S_0$ -системы отражает достигнутый к моменту времени  $t$  результат операции  $y^t$ .

В общем случае  $y^t$  есть управляемый случайный процесс  $\{y_0, y_1, \dots, y_t\}$  с дискретным или непрерывным временем.

Часто результат операции  $y^t$  вводят как функционал от выходного процесса.

Выход  $S_0$ -системы к моменту  $t$  зависит от процесса  $z^t$  смены состояний системы до момента  $t$ , от стратегий  $u^{t-1}$  ЛПР и других субъектов системы  $V^{t-1}$ , а также от случайных возмущений  $\lambda_E$  и возмущений нестохастического характера  $\lambda_j^N$ .

### 10.1.7. Оператор выхода

Функцию выхода в общем виде можно записать следующим образом:

$$y^t = h(z^{t-1}, u^{t-1}, v^{t-1}, \lambda_E, \lambda_j^N). \quad (10.8)$$

Пусть  $Y$  — пространство выходной переменной. Оператор выхода удобно записать в символической форме в виде соответствия

$$H: Z \times U \times V \times T \times \Lambda \rightarrow Y. \quad (10.9)$$

В сокращенной записи результат операции (реальный, фактический результат) обозначим  $y(u, v)$ , т. е. в виде зависимости  $y$  от стратегии ЛПР и других распорядителей системы (или  $y(u)$ , если последние отсутствуют).

При наличии случайных факторов  $\lambda_E$  выход  $y^t$  может быть случайной переменной (случайным событием, случайной величиной или случайным процессом). Распределение выходной случайной переменной задаётся следующим образом. Вводится измеримое пространство  $\langle Y, \Sigma_y \rangle$ , где  $\Sigma_y$   $\sigma$ -алгебра на  $Y$ . Условная вероятностная мера в этом пространстве определяется соотношением

$$\kappa_t(\Sigma_y | z^{t-1}, u^{t-1}, v^{t-1}) = P(\hat{y}_t \in \Sigma_y | z^{t-1}, u^{t-1}, v^{t-1}). \quad (10.10)$$

## 10.2. Общая схема операции

На рис. 10.1 приведена общая схема операции для исследуемой системы  $S$ . На этом рисунке введены следующие обозначения:

$S_A$  и  $S_B$  — соперничающие подсистемы в рассматриваемой системе  $S_0$ ;

$C_A, C_B$  — ресурсы систем  $A$  и  $B$  соответственно;

$A_0$  — цель операции с точки зрения стороны  $A$ ;

$X$  – множество входных факторов;  
 $Y$  – пространство выходной переменной;  
 $Z$  – состояние системы во множестве всех возможных состояний;

$U$  – множество управляющих воздействий системы  $S_B$ ;

$V$  – множество управляющих воздействий системы  $S_A$ ;

$T$  – текущее время;

$t$  и  $t-1$  – индексы в состояниях и управляющих воздействиях системы, соответствующие текущему и предыдущему времени анализа;

$\Lambda$  – множество воздействующих факторов, в том числе неопределённых (поведенческих  $\Lambda_E$ , природных  $\Lambda_O$ ) или случайных;

$PЦ$  – распорядительные центры ( $PЦ_A$  и  $PЦ_B$ );

$\varphi$  – оператор перехода;

$H$  – оператор выхода;

$W(u, v)$  – показатели эффективности операции;

$K$  – критерий эффективности операции.

### Описание блоков

Блок 1 отображает операторы перехода  $\varphi$  (10.3) и выхода  $H$  (10.9).

Активные средства лица, принимающего решения (ЛПР), отражены на схеме блоком 2.

Обычно на каждый вид ресурсов накладываются ограничения в виде неравенств  $C_i^u \leq C_{i0}^u$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ).

Активные средства других субъектов системы отображены совокупностью блоков 3.

В блоке 4 формируется показатель эффективности операции  $W(u, v)$ .

Стратегии лица, принимающего решения, и других субъектов системы вырабатываются соответственно в блоке 5:

$$u_t = \varphi_B(Z^t, u^{t-1})$$

и в группе блоков 6:

$$u_t = \varphi_A(Z^t, v^{t-1}).$$

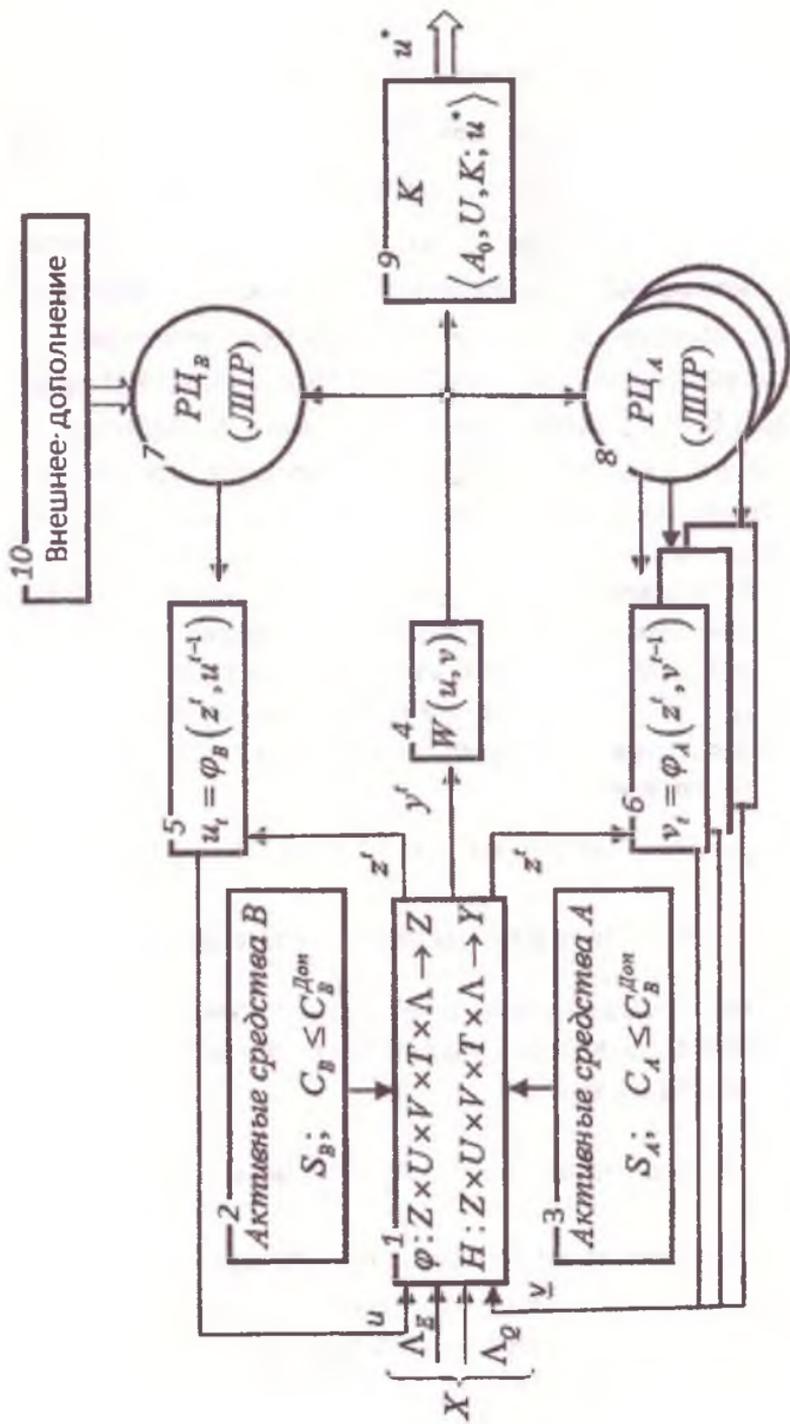


Рис. 10.1. Обобщённая схема операции

Блок 7 отображает основной распорядительный центр (лицо, принимающее решение - ЛПР). Остальные распорядительные центры отражены серией блоков 8.

Блок 9 отображает критерий эффективности  $K$ . В этом блоке формируется задача принятия решения  $\langle A_0, U, K; u^* \rangle$ , которая формулируется следующим образом: выбрать рациональную стратегию  $u^*$  из множества допустимых стратегий  $U$ , используя критерий  $K$  при сформулированной цели операции  $A_0$  и предполагаемых действиях других субъектов системы, отражаемых их стратегиями.

Блок 10 формирует внешнее дополнение для задачи принятия решения. Этот блок не входит непосредственно в  $S_0$ -систему.

В общем случае можно допустить, что каждый субъект системы пользуется своим показателем эффективности, отражающим его интересы в операции.

Критерий эффективности  $K$ , которым пользуется ЛПР, формируется на основе определённых принципов принятия решений с учетом стремлений других субъектов системы к достижению своих целей в операции. Эти принципы принятия решений при использовании векторного показателя эффективности рассматриваются с использованием теории игр:

$$\{W^\omega(u, v), W^\alpha(u, v), W^{\alpha\beta}(u, v), \dots, W^{\alpha\beta\gamma}(u, v)\}^T. \quad (10.11)$$

### 10.3. Частные описания операций

Рассмотренная общая схема операции позволяет подойти к исследованию большого класса конкретных операций как к частным случаям этой общей схемы.

#### 10.3.1. Задачи математического программирования

Пусть  $S_0$ -система имеет только один распорядительный центр — ЛПР. В этом случае блоки 3, 6, 8 в общей схеме операции (см. рис. 10.1) отсутствуют. Факторы поведенческой неопределенности в такой системе не имеют места.

Допустим, кроме того, что операция проводится за один шаг, а случайные факторы  $\Lambda_E$  и факторы природной неопределенности не

учитываются. При этом вход  $X S_0$ -системы определяется стратегией и  $u \in U$  ЛПР. Функция соответствия  $\rho(y(u), y^{mp})$  совпадает с показателем эффективности  $W(u)$  и, следовательно, существует функциональное соответствие между множеством допустимых стратегий  $U$  и множеством значений  $W$  показателя эффективности  $W(u)$ , т. е.

$$H : U \times \Lambda_F \rightarrow W. \quad (10.12)$$

Множество допустимых стратегий  $U = \{u : \eta(u)\} \leq C$  объединяет стратегии, удовлетворяющие ограничениям  $\eta(u) \leq C$ , где  $\eta(u)$  и  $C$  - векторы одинаковой размерности. В этих условиях обычно ставится следующая задача: найти  $u^* \in U$ , при которой показатель эффективности достигает экстремального значения, т. е.

$$u^* : \underset{u \in U}{extr} \in W(u). \quad (10.13)$$

Схема рассматриваемой операции изображена на рис. 10.2.

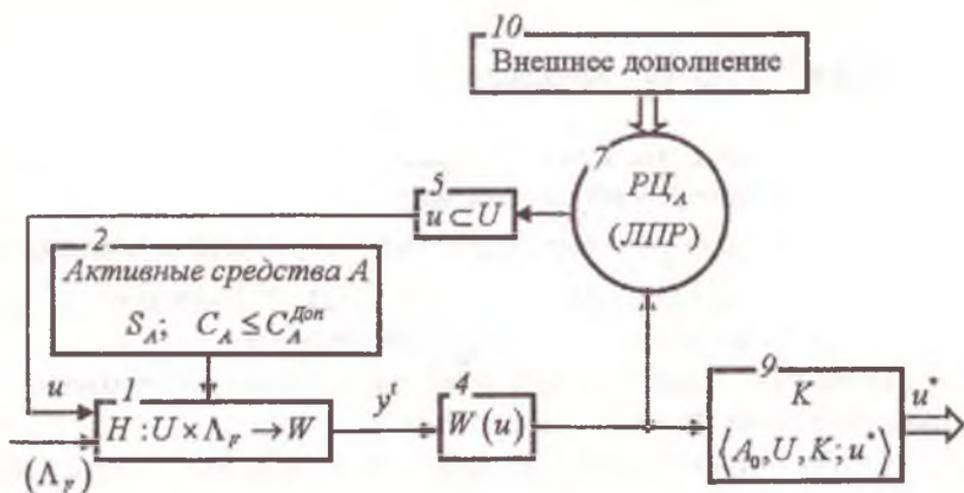


Рис. 10.2. Частная схема одноэтапной операции

Методы решения этой задачи изложены в обширной литературе по исследованию операций. При этом достаточно глубоко изучены частные постановки задач математического программирования и найдены эффективные алгоритмы их решения.

Задачи математического программирования классифицируются в зависимости от вида функции  $W(u)$ , ограничивающих неравенств  $\eta(u) \leq C$  и ряда других признаков.

Так, если  $W(u)$  есть линейная функция от аргумента  $u = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  и  $\eta(u) \leq C$  – система линейных неравенств, то (10.13) есть задача линейного программирования.

При несоблюдении хотя бы одного из этих условий задача (10.13) становится задачей нелинейного программирования.

Последняя задача имеет широкое множество частных постановок задач.

Так, при линейной системе ограничивающих неравенств и квадратичной зависимости  $W(u)$  ставится задача квадратичного программирования.

Если множество  $U$  и функция  $W(u)$  выпуклы, то формулируют задачу выпуклого программирования.

При целочисленных значениях  $u \in U$  ставится задача целочисленного программирования.

### 10.3.2. Задачи стохастического программирования

Предположим, что в условиях рассмотренной задачи необходимо учесть действие случайных факторов  $\Lambda_E$ .

Очевидно, при этом выход  $y(u)$  будет случайной переменной  $u$ , следовательно, функция соответствия  $\rho(y(u), y^{mp})$  вводится как числовая случайная переменная (случайная величина).

Показатель эффективности  $W(u)$  представляет собой математическое ожидание функции соответствия.

Система ограничивающих неравенств  $\eta_i(u, \lambda_E) \leq C_i, (i = 1, 2, \dots, m)$  также может иметь стохастический характер. Поэтому её заменяют обычно либо системой

$$M[\eta_i(u, \lambda_E)] \leq C_i, \quad (10.14)$$

либо

$$P(\eta_i(u, \lambda_E) \leq C_i) \geq \gamma_i, \quad (10.15)$$

где  $\gamma_i$  – заданные уровни вероятности того, что  $i$ -е неравенство  $\eta_i(u, \lambda_\varepsilon) \leq C_i$  будет выполнено.

Оператор выхода  $H$  здесь примет вид

$$H : U \times \Lambda \rightarrow R_e^1,$$

где  $R_e^1$  – множество действительных чисел, на котором определяется функция соответствия.

В этих условиях может быть поставлена следующая задача стохастического программирования: найти  $u^* \in U$ , при которых показатель эффективности достигает экстремального (например, максимального) значения, т. е.  $u^* : \max_{u \in U} W(u)$  при вероятностных ограничениях (10.14) или (10.15).

Разнообразие различных частных задач стохастического программирования весьма обширно.

Эти задачи классифицируются в зависимости от вида функции соответствия и ограничивающих неравенств, от типа распределений случайных переменных, учитываемых моделью операции, и ряда других признаков.

### 10.3.3. Задачи оптимального управления

В условиях рассмотренных двух частных случаев теперь пусть проводится многошаговая операция.

$S_0$ -система на каждом шаге процесса ( $t = 0, 1, 2, \dots$ ) может менять свои состояния в соответствии с оператором перехода:

$$\varphi : Z \times U \times T \rightarrow Z \tag{10.16}$$

(процессы с полной информацией, в которых действием возмущающих факторов можно пренебречь) или

$$\varphi : Z \times U \times T \times \Lambda \rightarrow Z \tag{10.17}$$

(процессы с неполной информацией, учитывающие действия возмущающих факторов  $\Lambda$ ).

Результат многошаговой операции обычно вводится как функционал выходного процесса к некоторому моменту времени (конец операции). Оператор выхода  $H$  удобно представить в виде

$$H : Z \times U \times T \times \Lambda \rightarrow R_e^1, \tag{10.18}$$

где  $R_c^1$  – пространство значений функции соответствия  $\rho(y(u), y^{mp})$ .

Если действия возмущающих факторов  $\Lambda$  не учитываются, то  $R_c^1$  отождествляется с пространством значений показателя эффективности  $W$ , т.е.

$$H: Z \times U \times T \rightarrow W. \quad (10.19)$$

Учёт возмущений случайного характера приводит к необходимости введения вероятностной меры на пространстве  $R_c^1$ . Тогда в качестве показателя эффективности принимают математическое ожидание функции соответствия, которая в этих условиях является случайной величиной.

Случайный характер функции соответствия обусловлен тем, что процесс смены состояний  $Z'$  системы является случайным управляемым процессом и, следовательно, результат  $y(u)$ , вводимый как функционал от этого процесса, есть случайная величина, а функция  $\rho(y(u), y^{mp})$  как функция случайного аргумента будет также случайной величиной.

В детерминированном случае (процессы с полной информацией) ЛПР, выбирая на каждом шаге многоэтапного процесса управления операцией стратегию  $u_i \in U$ , стремится получить экстремум показателя эффективности и не нарушить при этом систему различного рода ограничений.

Такая задача является основной в современной теории оптимального управления.

Эффективные методы решения этой задачи в зависимости от конкретных условий ее постановки основаны на принципе оптимальности Беллмана (динамическое программирование) или на принципе максимума Понтрягина.

#### *10.3.4. Задачи вариационного исчисления*

При некоторых достаточно сильных ограничениях задача может быть поставлена в классическом варианте как задача вариационного исчисления.

При учёте случайных возмущений (процессы с неполной информацией) приходится использовать вероятностное описание про-

цесса. ЛПР, выбирая на каждом шаге определённую стратегию  $u$ , из множества допустимых, изменяет лишь распределение вероятностей перехода системы из одного состояния в другое.

Однако и в этом случае выбор стратегий подчинен стремлению ЛПР достичь экстремального значения показателя эффективности операции.

Подобная задача также рассматривается в современной теории оптимального управления. Однако решение её в общем виде не получено. Тем не менее, достаточно полно разработаны различные методы управления случайными процессами при некоторых дополнительных предположениях.

В частности, при описании функционирования многих технических систем используются марковские управляемые случайные процессы.

### 10.3.5. Марковские управляемые случайные процессы

В марковском случайном процессе распределение вероятностей переходов в различные состояния к моменту времени  $t$  зависит лишь от состояния  $Z_{t-1}$ , в котором находилась система в момент времени  $t-1$ , но не зависит от траектории процесса до момента  $t-1$ .

Таким образом, для марковского процесса имеет место следующее равенство условных вероятностей перехода в состояние  $Z_t$ :

$$P(z_t | z^{t-1}) = P(z_t | z_{t-1}),$$

где  $P(z_t | z^{t-1})$  – условная вероятность перехода системы в состояние  $Z_t$  к моменту времени  $t$ , вычисленная в предположении, что до момента  $t$  система прошла состояния  $z_0, z_1, \dots, z_{t-1}$ ;

$P(z_t | z_{t-1})$  – условная вероятность перехода системы в состояние  $Z_t$  к моменту времени  $t$ , вычисленная в предположении, что в момент  $t-1$  система находилась в состоянии  $Z_{t-1}$  (здесь предыстория процесса  $z^{t-2}$  не учитывается). Марковский случайный процесс называют *управляемым*, если условное распределение вероятностей состояний к моменту  $t$  формируется на основе выбранной ЛПР стратегии  $u_{t-1}$  из множества допустимых на предыдущем шаге процесса.

## Контрольные вопросы

1. Чем характеризуется состояние системы и как формально представляется функционирование системы?

2. Охарактеризуйте следующие понятия:

- входные параметры системы;
- функция перехода;
- оператор перехода;
- оператор выхода.

3. Приведите общую схему операции. Какие блоки в неё входят? Охарактеризуйте их.

4. Приведите схему частного описания операций.

5. Охарактеризуйте следующие частные задачи операций:

- математического программирования;
- стохастического программирования;
- оптимального управления;
- вариационного исчисления.

6. Охарактеризуйте марковские управляемые случайные процессы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем учебном пособии рассмотрены вопросы введения в концептуальные и методологические основы исследования эффективности целенаправленных процессов (операций) в организационно-технических системах, каковыми и являются ракетно-космические системы. Рассматриваются основные понятия, связанные с исследованием операций, принципы исследования целенаправленных процессов, задачи исследования эффективности сложных технических и организационно-технических систем. Обсуждаются методы оценивания и исследования эффективности функционирования организационно-технических систем, методы построения математических моделей операционного комплекса.

Многие вопросы в этом учебном пособии не затрагивались из-за ограниченности объема пособия, многочисленности частных вопросов и сложности решаемых проблем при создании сложных технических и организационно-технических систем.

Желающих более подробно изучить методы исследования эффективности организационно-технических систем отсылаем к списку использованных источников.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Инженерный справочник по космической технике [Текст] / ред. коллегия: И. И. Караваев, А. А. Кудряшов, А. П. Лимаренко [и др.]; под общ. ред. А. В. Солодова. – М.: Министерство обороны, 1969. – 693 с.
2. Проектирование и испытания баллистических ракет [Текст] / под ред. В.И. Варфоломеева и М.И. Копытова. – М.: Воениздат, 1970. – 302 с.
3. Дракин, И. И. Основы проектирования беспилотных ЛА с учетом экономической эффективности [Текст] / И. И. Дракин. – М.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
4. Москаленко, Г.М. Инженерные методы проектирования в ракетодинамике [Текст] / Г. М. Москаленко. – М.: Машиностроение, 1974. – 392 с.
5. Шеверов, Д. Н. Проектирование беспилотных летательных аппаратов [Текст] / Д. Н. Шеверов. – М.: Машиностроение, 1978. – 264 с.
6. Феодосьев, В. В. Основы техники ракетного полета [Текст] / В.В.Феодосьев. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 496 с.
7. Ракеты-носители [Текст] / под ред. проф. С.О. Осипова. – М.: Военное изд-во министерства обороны СССР, 1981. - 315 с.
8. Физический энциклопедический словарь [Текст] / гл. ред. А. М. Прохоров. – М.: Советская энциклопедия, 1983.
9. Основы проектирования летательных аппаратов (транспортные системы) [Текст]: учеб. для технических вузов /В.П.Мишин, В. К. Безвербый, Б.М. Панкратов [и др.]; под ред. В. П. Мишина. – М.: Машиностроение, 1985. – 360 с.
10. Космонавтика. Энциклопедия [Текст] / гл. редактор В.П. Глушко. – М.: Советская энциклопедия, 1985. – 528 с.
11. Конструкция и проектирование космических летательных аппаратов [Текст]: учеб. / Н. И. Паничкин, Ю.В.Слепушкин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – 344 с.
12. Основы синтеза систем летательных аппаратов [Текст]: учеб. пособие для студентов вузов / А. А. Лебедев, В. Н. Баранов, В. Т. Бобронников [и др.]; под ред. А. А. Лебедева. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
13. Гонин, Г. Б. Космические съемки Земли [Текст] / Г.Б.Гонин. – Л.: Недра, 1989. – 252 с.
14. Основы синтеза систем летательных аппаратов [Текст]. 2-е изд., доп. и перераб. / А. А. Лебедев, Г. Г. Аджимамудов, В. Н. Баранов [и др.]; под ред. А. А. Лебедева. – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 444 с.

15. Конструирование автоматических космических аппаратов [Текст] / Д. И. Козлов, Г. П. Аншаков, В. Ф. Агарков [и др.]; под ред. Д. И. Козлова. – М.: Машиностроение, 1996. – 448 с.

16. Управление космическими аппаратами зондирования Земли: Компьютерные технологии [Текст] / Д. И. Козлов, Г. П. Аншаков, Я. А. Мостовой [и др.]. – М.: Машиностроение, 1998. – 368 с.

17. Губанов, Б.И. Триумф и трагедия "Энергии". Размышления главного конструктора [Текст] Т. 3: "ЭНЕРГИЯ" - "БУРАН". / Б.И.Губанов. – Нижний Новгород: Изд-во НИЭР, 1998.

18. Надежность и эффективность в технике. [Текст]: справочник. Т. 3 / под ред. акад. АН СССР В.Ф.Уткина. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.

19. Соллогуб, А. В. Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли: Математические модели повышения эффективности КА [Текст] / А. В. Соллогуб, Г. П. Аншаков, В. В. Данилов; под ред. Д. И. Козлова. – М.: Машиностроение, 1993. – 368 с.

20. Куренков, В.И. Оценка весовой эффективности ракет-носителей при стартах с дирижабля и самолетов [Текст] / В.И. Куренков // Вестн. СГАУ. – №4 (20). – 2009. – С. 65-71.

21. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление [Текст] / М. Н. Красильщиков, В. Т. Бобронников [и др.]; под ред. В. В. Малышева. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 568 с.

22. Гущин, В. Н. Основы устройства космических аппаратов [Текст]: учеб. для вузов / В.Н. Гущин. – М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.

23. Основы проектирования летательных аппаратов (транспортные системы) [Текст]: учеб. для технических вузов / В.П.Мишин, В. К. Безвербый, Б.М. Панкратов [и др.]; под ред. А.М. Матвеевко и О.М. Алифанова. – М.: Машиностроение, 2005. – 375 с.

24. Куренков, В. И. Выбор основных проектных характеристик и конструктивного облика ракет-носителей [Текст]: учеб. пособие / В.И. Куренков, Л.П. Юмашев; под ред. чл.-кор. РАН Д.И. Козлова. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2005. – 240 с.

25. Советкин, Ю. А. Технико-экономический анализ летательных аппаратов [Текст]: учеб. пособие / Ю.А.Советкин. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 137 с.

26. Концепция развития российской пилотируемой космонавтики [Текст] // Новости космонавтики. – 2006. – №7 (282). – Т. 16.

27. Куренков, В.И. Выбор основных проектных характеристик и конструктивного облика ракет-носителей с использованием системы твердотельного моделирования [Текст]: учеб. пособие / В.И.Куренков. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 178 с.

28. Куренков, В.И. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения [Текст]: учеб. пособие

/ В. И. Куренков, В. В. Салмин, Б. А. Абрамов. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 296 с.

29. Куренков, В.И. Моделирование целевого функционирования космических аппаратов наблюдения с учетом энергобаланса [Текст]: учеб. пособие / В. И. Куренков, В. В. Салмин, Б. А. Абрамов. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 160 с.

30. Куренков, В.И. Методика выбора основных проектных характеристик и конструктивного облика космических аппаратов наблюдения [Текст]/ В. И. Куренков, В. В. Салмин, А. Г. Прохоров – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 160 с. (имеется электронный учебник).

31. Куренков, В. И. Методы расчета и обеспечения надежности ракетно-космических комплексов [Текст]: учеб. пособие / В. И. Куренков, В. А. Капитонов – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 320 с.

32. Есипов, Б.А. Методы исследования операций [Текст]: учеб. пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 256 с.

33. Гаврилов, В. Н. Автоматизированная компоновка приборных отсеков летательных аппаратов [Текст] / В. Н. Гаврилов. – М.: Машиностроение, 1988. – 137 с.

34. Друшляков, Ю.И. Теоретические основы программирования [Текст] / Ю.И. Друшляков, И.В. Ежова. – М.: МАИ, 1986. – 60 с.

35. Надежность и эффективность в технике [Текст]: справочник. Т. 1 / под ред. д-ра техн. наук А. И. Рембезы. – М.: Машиностроение, 1986. – 224с.

36. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений [Текст] / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 166с.

37. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1989.

38. Росоховатский, И. М. Принцип надежности. [Текст] / И. М. Росоховатский, <http://www.litmir.net/br/?b=37433&p=1>.

39. Лебедев, А.А. Курс системного анализа [Текст] / А.А.Лебедев. – М.: Машиностроение, 2010. – 256 с.

Учебное издание

*Куренков Владимир Иванович*

**ВВЕДЕНИЕ В ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Учебное пособие*

Редакторская обработка Т.К. Крестина  
Доверстка Т.Е. Половнева

Подписано в печать 23.06.2014. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 12,75.  
Тираж 200 экз. Заказ *104*. Арт. – 8/2014.

Самарский государственный  
аэрокосмический университет.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского государственного  
аэрокосмического университета.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.