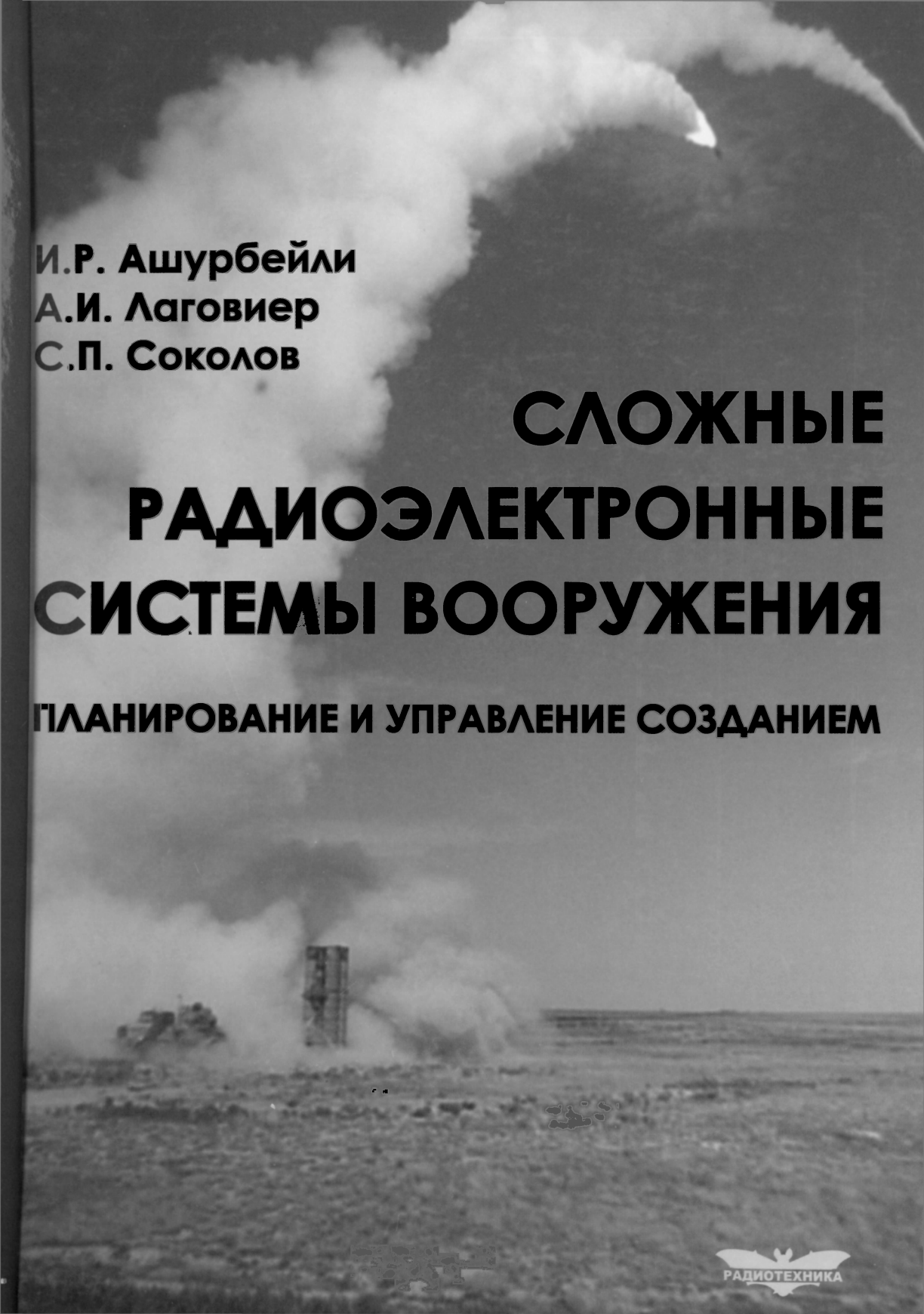




**И.Р. Ашурбейли
А.И. Лаговьер
С.П. Соколов**

СЛОЖНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ВООРУЖЕНИЯ

ПЛАНИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ СОЗДАНИЕМ

**И.Р. Ашурбейли
А.И. Лаговьер
С.П. Соколов**

СЛОЖНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ВООРУЖЕНИЯ

ПЛАНИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ СОЗДАНИЕМ

**Издательство «Радиотехника»
Москва 2010**

УДК 621; 623;629

А 98

ББК 68.5;22.3

Р е ц е н з е н т :

д.ф.-м.н., проф. *В.А. Черепенин*
(ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

Ашурбейли И.Р., Лаговниер А.И., Соколов С.П.

А98 Сложные радиоэлектронные системы вооружения. Планирование и управление созданием. – М.: Радиотехника, 2010. – 438 с.: ил.

ISBN 978-5-88070-269-5

Дана общая характеристика вооружения и военной техники как объектов системных исследований, раскрыто содержание военно-научных и научно-технических задач и проблем, решаемых на стадиях жизненного цикла изделий. Рассмотрены основные положения квалитметрии, теории эффективности и исследования операций; основы теории принятия решений, задачи оптимизации со сравнением альтернатив по скалярному и векторному показателям качества; методы экспертного оценивания объектов выбора. Описаны различные аспекты системных исследований, выполняемых при планировании развития и разработке вооружения и военной техники; статистические методы обработки и анализа экспериментальных данных, включая методы дисперсионного, регрессионного и факторного анализов, а также методы планирования исследовательских испытаний. Описана система испытаний изделий и раскрыто содержание исследовательских испытаний. Значительное внимание уделено методам экспериментальных исследований.

Для широкого круга специалистов по радиолокации и дистанционному зондированию Земли, инженеров, научных сотрудников, связанных с проектированием гео-информационных систем, созданием и применением средств радиолокационного землеобзора гражданского и военного назначения, а также для преподавателей, аспирантов и студентов соответствующих факультетов вузов.

ISBN 978-5-88070-269-5

УДК 621;623;629

ББК 68.5;22.3

© Авторы, 2010

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1. Вооружение и военная техника как объекты исследования	11
1.1. Общие понятия и характеристики ВВТ как объектов исследований	11
1.2. Жизненный цикл образцов ВТ. Военно-научные и научно-технические задачи и проблемы, решаемые на стадиях жизненного цикла ВТ	16
1.3. Системное представление объектов исследований	32
1.3.1. Понятие системы. Основные свойства и классификация	32
1.3.2. Структура системы	41
1.3.3. Методы формализованного представления систем	42
1.3.4. Управление в системах	50
1.3.5. Функции систем управления	52
1.3.6. Требования, предъявляемые к системам управления	54
1.4. Представление изделий ВТ как объектов исследований	54
1.4.1. Свойства и качество изделий	54
1.4.2. Показатели качества и критерии оценивания качества изделий	65
1.4.3. Классификация показателей качества изделий	73
1.5. Качество и эффективность операций, выполняемых военно-технической системой	76
1.5.1. Основы теории эффективности и исследования операций	76
1.5.2. Качество результатов функционирования системы и операций	85
1.5.3. Эффект и эффективность операции	88
1.5.4. Показатели и критерии качества и эффективности операции	94
2. Методы системных исследований, применяемые при планировании развития и разработке вооружения и военной техники	103
2.1. Основы методологии военно-научных исследований	103
2.2. Военная наука, ее задачи и содержание	112
2.3. Методы и средства исследований систем ВВТ	119
2.4. Тактико-технико-экономическое обоснование развития систем ВВТ	130
3. Радиоэлектронные системы управления вооружением и военной техникой	134
3.1. Особенности радиоэлектронных систем ВВТ	134
3.2. Критерии эффективности радиоэлектронных систем управления ВВТ	143

3.3. Методы оценки показателя эффективности радиоэлектронных систем управления ВВТ	145
3.4. Исследование операций, анализ и синтез радиоэлектронных систем управления ВВТ	154
3.4.1. Системный подход и системный анализ	158
3.4.2. Структурный подход и структурный анализ	168
3.4.3. Функциональный подход и анализ	172
4. Проектирование и разработка систем вооружения и военной техники	176
4.1. Основные принципы проектирования систем ВВТ	176
4.2. Методы проектирования систем ВВТ	183
4.3. Методические основы исследований, выполняемых при планировании и разработке систем ВВТ	188
4.4. Формализация задачи проектирования систем ВВТ	193
4.5. Декомпозиция задачи проектирования систем ВВТ	200
4.6. Теория принятия решений при проектировании систем ВВТ	205
4.7. Классификация и общая характеристика задач принятия решений при проектировании и разработке систем ВВТ	213
5. Методы и организация испытаний образцов вооружения и военной техники	220
5.1. Цели и задачи испытаний образцов ВВТ	220
5.2. Организационные, методические основы и технология испытаний образцов ВВТ	226
5.3. Анализ требований к организации испытаний образцов ВВТ	228
5.4. Выбор методов испытаний образцов ВВТ	229
5.5. Выбор условий испытаний образцов ВВТ	237
5.6. Применение сетевых методов планирования испытаний образцов ВВТ	246
6. Натурные испытания образцов вооружения и военной техники	250
6.1. Задачи, решаемые при подготовке и проведении натурных испытаний образцов ВВТ	250
6.1.1. Оптимизация плана натурных испытаний образцов ВВТ	252
6.1.2. Задача выбора числа экспериментов методом динамического программирования	253
6.1.3. Задача оптимального распределения средств экспериментально-исследовательской базы	255
6.2. Испытания программных алгоритмов	257
6.2.1. Особенности разработки программ большого масштаба	257
6.2.2. Организация и методы испытаний программно-реализованных алгоритмов	262
6.2.3. Методика сбора и обработки данных при испытаниях программ	269

7. Методы получения траекторной информации при испытаниях образцов вооружения и военной техники	273
7.1. Системы координат, используемые при траекторных измерениях	273
7.1.1. Геодезические системы координат	274
7.1.2. Полигонные системы координат	279
7.1.3. Перенос прямоугольных систем координат с учетом кривизны поверхности Земли	282
7.1.4. Преобразование систем координат с учетом кривизны поверхности Земли	285
7.1.5. Астрономические системы координат	294
7.2. Взаимосвязь между системами координат, используемых при траекторных измерениях	298
7.3. Методы получения траекторной информации	304
7.3.1. Лучевой метод	304
7.3.2. Пеленгационный метод	312
7.3.3. Дальномерный метод	317
7.3.4. Разностно-дальномерный метод	321
7.4. Методы измерения скорости	323
7.4.1. Метод численного дифференцирования	323
7.4.2. Однопунктный метод	325
7.4.3. Двухпунктные методы	326
7.4.4. Многопунктный беззапросный метод	331
7.5. Методы измерения параметров сближения объектов	335
7.5.1. Однопунктный и пеленгационный методы	336
7.5.2. Дальномерный метод	341
7.5.3. Определение относительной скорости и угловых направлений	344
7.6. Статистические методы обработки траекторной информации	345
7.6.1. Метод наименьших квадратов	345
7.6.2. Метод максимума правдоподобия	352
7.6.3. Методы решения систем линейных уравнений	361
7.7. Ошибки сглаживания методом наименьших квадратов	366
8. Автоматизированная система моделирования испытаний образцов вооружения и военной техники	369
8.1. Состав средств АСМ образцов ВВТ	369
8.1.1. Комплексная испытательная моделирующая установка	369
8.1.2. Испытательные моделирующие стенды	373
8.1.3. Испытательные имитаторы	374
8.1.4. Математические модели	376
8.2. Варианты применения средств моделирования в составе АСМ для проведения испытаний образцов ВВТ	376
8.2.1. Варианты применения КИМУ в составе АСМ	376
8.2.2. Варианты применения ИМС в составе АСМ	379
8.2.3. Варианты применения ИИ в составе АСМ	381
8.2.4. Варианты применения математических моделей в составе АСМ	388

8.3. Синтез структуры АСМ	393
8.4. Методика анализа информационных потоков в АСМ	394
8.5. Разработка метода синтеза оптимальной распределенной комплексной модели АСМ	398
8.5.1. Общая схема синтеза оптимальной распределенной комплексной модели АСМ	398
8.5.2. Выбор структуры программного комплекса	400
8.5.3. Анализ информационных потоков в АСМ	401
8.5.4. Оптимизация структуры РКМ	412
8.5.5. Реализация оптимальной РКМ	424
Заключение	425
Литература	427
Complicated radio-electronic systems of armament. Planning and management of creation	433

ВВЕДЕНИЕ

В условиях развития научно-технического прогресса задачей первостепенной важности является формирование специалистов широкого профиля, имеющих глубокие фундаментальные теоретические научные знания и необходимые практические умения и навыки, разностороннюю профессиональную подготовку, обеспечивающую долговременное и эффективное использование полученных знаний и навыков в практической работе по исследованию и испытанию военной техники.

Испытатель-исследователь – это инженер-исследователь. Он должен хорошо знать объект исследования на уровне схемотехнических и системных представлений, владеть методами системных исследований, иметь практические навыки в планировании и организации исследований и испытаний сложных радиоэлектронных систем, обладать широким кругозором и развитым научным мышлением. Знания инженера должны быть системными и ориентированными на решение перспективных практических и научных проблем.

Системный анализ обеспечивает научно обоснованный подход к изучению и решению задач теории и практики, раскрывая не только принципы, но и познавательную и методологическую сущность методов научного познания, поэтому научный специалист, исследователь-испытатель, должен в совершенстве владеть системными методами исследований и постоянно руководствоваться ими в своей практической деятельности. Кроме общих методологических основ требуется знание конкретных методов научных исследований с учетом концепций системного подхода.

Высокий уровень подготовки инженера достигается только на прочном фундаменте математических наук. Математический аппарат инженера, являющийся эффективным средством научных исследований, может быть определен как взаимосвязанная совокупность языка, моделей и методов прикладной математики, ориентированных на решение инженерных задач.

Большинство прикладных исследований связано с экспериментом. В последние годы сам эксперимент стал объектом интенсивных исследований, т.е. теперь уже можно говорить о возникновении нового научного направления – *математической теории эксперимента*. В теоретическом отношении это направление базируется на методах теории вероятностей, математической статистики и кибернетики, а практически оно опирается на применение ЭВМ. Знание основ современной теории эксперимента и статистических методов обработки и анализа его результатов способствует более эффективному проведению научных исследований и более рациональному получению экспериментальных данных, необходимых исследователю для подтверждения выдвигаемых теоретических положений. Все это говорит о важном методологическом значении для инженера науки об эксперименте.

Натурные эксперименты, принципиально являясь наиболее достоверным источником информации о характеристиках сложных радиотехнических систем, не позволяют решить все задачи исследований в приемлемые сроки и при допустимых материальных затратах. Обычно реализация всего комплекса возможных условий функциони-

рования исследуемой сложной системы оказывается практически неосуществимой. В связи с этим все более широкое применение получают комбинированные методы исследования сложных систем, совместно использующие аналитические методы, метод статистических испытаний моделей и натурные испытания реальных систем. Главная цель, которая достигается с помощью комбинированных методов, – использование, по возможности, всей информации о вероятностных характеристиках системы, полученной при различных видах исследований и на различных этапах их проведения, для более точного оценивания показателей качества или для получения их с требуемой точностью, но при возможно меньшем числе экспериментов с системой и ее моделью.

Реализация комбинированных методов осуществляется в рамках опытно-теоретического метода исследований, базирующегося на научно-обоснованном рациональном сочетании сравнительно небольшого числа ресурсоемких натурных экспериментов с достаточно большим объемом моделирования и аналитических расчетов.

Моделирование является универсальным методом исследований. Наличие модели, адекватной в определенном смысле реальному объекту, дает возможность переносить исследование объекта на модель и затем по характеристикам модели делать выводы о характеристиках объекта-оригинала посредством умозаключения по аналогии. Особенно результативным при исследовании сложных систем является имитационное моделирование на ЭВМ, основанное на применении машинных моделей, воспроизводящих процессы функционирования систем с сохранением их логической структуры и последовательности чередования во времени происходящих событий. В настоящее время машинное математическое моделирование служит достаточно универсальным и высокоэффективным средством решения научных и практических задач. Оно в значительной степени дополняет методы аналитических (формульных) и экспериментальных исследований в рамках комплексного опытно-теоретического метода, а применительно к сложным проблемам и системам зачастую оказывается единственным средством получения данных, необходимых для принятия научно-обоснованных решений.

В инженерной деятельности вообще и, в частности, при разработке, исследовании, производстве, испытаниях, эксплуатации и применении по назначению различных технических систем (как и в любой целенаправленной деятельности) возникает необходимость принимать обоснованные решения научно-технического, организационного, управленческого и другого характера. Дисциплиной, изучающей правила подготовки и принятия решений и занимающейся научным их обоснованием, является *теория принятия решений* (составная часть науки о целенаправленной деятельности).

К ряду научных дисциплин, используемых в теории принятия решений, относят: математическое программирование, теорию игр, теорию статистических решений, теорию оптимального управления, исследование операций, системный анализ и др. Все эти дисциплины занимаются рассмотрением одной и той же основной проблемы – научным анализом ряда возможных способов действия с целью нахождения такого из них, который в данных условиях был бы наилучшим (оптимальным решением) или рациональным (при выборе альтернатив). Знание научно обоснованных методов подготовки и принятия решений является необходимым условием высокой эффективности научно-технической деятельности современных инженеров-исследователей. Только на основе научного подхода возможно планомерное повышение качества принимаемых решений.

Значительную роль в военном деле играют методы и модели теории эффективности и исследования операций. Появление и становление этих методов и моделей преж-

де всего и было обусловлено потребностями военно-научных исследований, решением задач планирования военных операций (боевых действий) и анализа их эффективности. В современных условиях основными направлениями применения методов исследования операций в военном деле являются:

- оценивание эффективности применения вооружения по назначению, обеспечивающее обоснованный выбор его тактико-технических характеристик и способов боевого применения;

- военно-экономическое оценивание качества вооружения и связанное с ним решение задач выбора оптимального варианта развития вооружения и научно обоснованного планирования в области военного строительства;

- научно обоснованное решение задач планирования боевых действий войск;

- прогнозирование возможного хода и исхода боевых действий;

- оценивание эффективности вариантов выполнения различных организационно-технических мероприятий в течение жизненного цикла образцов вооружения и т.д.

Владение аппаратом теории эффективности и исследования операций способствует повышению эффективности работы специалистов по обоснованию и выбору вариантов действий, дающих возможность наилучшим образом использовать ресурсы, выделяемые на выполнение разнообразных организационно-технических мероприятий, в том числе экспериментальных исследований в рамках комплексного опытно-теоретического метода, что применительно к сложным проблемам и системам зачастую оказывается единственным средством получения данных, необходимых для принятия обоснованных решений.

Повышение уровня научных исследований и оперативности получения результатов требует комплексного и активного использования методов теории эффективности, исследования операций и принятия решений на основе системного подхода и математического моделирования с автоматизацией процесса исследований, которая достигается с помощью формализованного представления изучаемого объекта в виде математических моделей, программно реализуемых на ЭВМ в составе автоматизированных систем анализа. Этому способствует также применение формализованных моделей принятия решений, предполагающих использование диалоговых режимов работы с машинными моделями исследуемых объектов.

Единый комплекс математических моделей исследуемых объектов и моделей принятия решений, реализованных на базе современных ЭВМ, составляет основу автоматизированных систем многовариантного анализа и прогнозирования характеристик сложных технических систем, а также принятия рациональных решений по вариантам проектных разработок и способов применения этих систем по назначению. Математические модели объекта исследования с требуемой точностью воспроизводят процессы его функционирования при заданных внешних воздействующих факторах и обеспечивают получение дополнительной к экспериментальным данным информации, необходимой для принятия соответствующих решений. Модель принятия решения (модель рационального выбора) содержит критерии оценивания предпочтительности сравниваемых вариантов решения и выделения среди них рационального варианта. Она ориентируется на многовариантный подход к формированию сравниваемых решений и использование принципа компромисса для выбора рационального варианта среди не доминирующих вариантов решений.

Разнообразие и сложность исследований современных технических систем обуславливает необходимость использования широкого диапазона методов и средств на-

учных исследований, начиная с классических и кончая современными методами и средствами, учитывающими системный характер объекта исследования. Это затрудняет подготовку специалистов в области методологии исследований. Поэтому основное внимание необходимо сосредоточить на *методах системных исследований*, которые применяются для решения таких важных *военно-научных и научно-технических проблем и задач*, как:

- обоснование направлений развития различных конкретных областей техники, изыскание перспективных принципов построения технических систем и научно-технических путей разработки новых и модернизации существующих образцов техники;

- обоснование и задание требований к техническим системам, подлежащим разработке;

- анализ и оценивание качества разрабатываемых и испытываемых систем;

- разработка и реализация предложений по эффективным способам применения по назначению технических систем, а также предложений по совершенствованию их эксплуатации;

- оценивание эффективности выполнения организационно-технических мероприятий, связанных с планированием развития, разработкой, испытаниями, производством, эксплуатацией и ремонтом систем разного назначения;

- разработка эффективных способов, методов и приемов испытаний, обоснование требований к методам и средствам обеспечения испытаний;

- планирование и организация методического, метрологического, материально-технического и других видов обеспечения исследований и испытаний технических систем;

- научно-методическое сопровождение опытно-конструкторских работ, отработки и ввода в эксплуатацию новых систем.

Необходимо рассматривать различные аспекты системных исследований, проводимых на базе системного, структурного и функционального подходов к изучению сложных проблем и систем с выходом на проблематику тактико-технико-экономического обоснования и планирования развития вооружения проектно-исследовательских работ, испытаний изделий, моделирования систем и автоматизации исследований. С целью увязки методов научных исследований с объектом исследований и задачами, решаемыми на различных стадиях его жизненного цикла, дается описание системы как объекта исследования и содержания основных организационно-технических мероприятий, выполняемых на стадиях жизненного цикла технических систем и требующих научной проработки. Рассматриваются основные положения квалиметрии, теории эффективности и исследования операций, понятия и методические аспекты теории принятия решений. Ниже представлены наиболее важные современные статистические методы анализа экспериментальных данных, методы планирования экспериментов, а также методические основы автоматизации системных исследований на базе опытно-теоретического метода и моделирования.

1. ВООРУЖЕНИЕ И ВОЕННАЯ ТЕХНИКА КАК ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Общие понятия и характеристики ВВТ как объектов исследований

Дадим некоторые общие понятия и определения, используемые при исследовании военной техники.

Научное исследование – процесс выработки новых научных знаний, т.е. такое систематическое и целенаправленное изучение объектов, в котором используются научные принципы, методы и средства решения исследовательских задач, завершающееся формированием новых научных знаний об изучаемых объектах. Научные исследования в области военного дела относятся к военно-научным исследованиям.

Объект исследования – объект или явление, подвергаемое исследованию с целью познания его сути, закономерностей развития и возможности последующего использования полученных результатов. В каждом конкретном исследовании рассматриваются не все стороны изучаемого объекта; с определенной целью исследуются его отдельные свойства (группы свойств) и отношения. Эти свойства и отношения составляют предмет данного исследования.

Специфическими и весьма важными объектами военно-научных исследований являются вооружение и военная техника (ВВТ), а также разнообразные оперативно-тактические и организационно-технические мероприятия, выполняемые в течение их жизненного цикла.

Военно-научные исследования в области вооружения и военной техники направлены на разработку и решение разнообразных военно-научных и научно-технических проблем и задач. Их содержанием является: обоснование основных направлений и перспектив развития вооружения, разработка теоретических основ и технических принципов его построения; совершенствование состоящей на вооружении техники; разработка способов боевого применения вооружения, методов повышения боевой готовности войск и т.д. Целью проведения исследований является развитие конкретных областей вооружения и военной техники; улучшение технической оснащенности, повышение боеготовности и боеспособности войск.

Под *военной техникой* (ВТ) понимается особая разновидность техники, предназначенная для ведения вооруженной борьбы, т.е. это технические средства, системы, комплексы, образцы, предназначенные для боевого, технического и тылового обеспечения боевых действий и обучения войск, а также оборудование и аппаратура для контроля и испытаний этих средств и входящие в эти средства составные части и комплектующие изделия межотраслевого применения.

Образец военной техники – изделие ВТ, предназначенное для выполнения боевых задач или задач технического, тылового или других видов обеспечения войск самостоятельно или в составе комплекса (системы) ВТ. Образец ВТ представляет собой совокупность составных частей и комплектующих изделий межотраслевого применения, а также оборудование и аппаратуру для обеспечения его эксплуатации и ремонта, включая учебно-тренировочные средства для обучения войск, объединенных общим конструктивным (схемным) решением и предназначенное для выполнения определенной тактической, технической или другой функциональной задачи как самостоятельно, так и в составе системы (комплекса) военной техники.

К *системе* (комплексу) ВТ относят совокупность функционально связанных образцов военной техники, инженерно-строительных сооружений и средств обеспечения, объединенных для самостоятельного выполнения стратегической, оперативно-тактической и других задач.

Составная часть образца (комплекса, системы) ВТ – самостоятельная часть изделия ВТ, предназначенная для выполнения определенных технических функций в составе образца (комплекса, системы) ВТ, представляющая собой совокупность сборочных единиц и (или) деталей, объединенных общим конструктивным (схемным) решением.

Комплектующее изделие межотраслевого применения – изделие ВТ, предназначенное для выполнения определенных технических функций в составе изделий ВТ или их составных частей, создаваемое не для конкретного изделия ВТ по самостоятельным комплектам конструкторской и технологической документации и не подвергаемое изменениям в процессе создания изделий ВТ, в которых его применяют. *Изделия* ВТ – системы, комплексы, образцы, их составные части, комплектующие изделия межотраслевого применения. В общем случае изделие – это любой предмет или набор предметов, подлежащих изготовлению на промышленном предприятии. При создании изделий предполагается, что они будут выполнять вполне определенные функции, позволят получить некоторый положительный эффект, будут удовлетворять определенные потребности в соответствии со своим целевым назначением.

Опытный образец изделия ВТ – изделие ВТ, изготовленное в ходе выполнения опытно-конструкторских работ (ОКР) по вновь разработанной рабочей конструкторской и технологической документации для проверки путем испытаний соответствия его параметров и характеристик требованиям ТТЗ (ТЗ) на ОКР и правильности принятых технических решений, а также для решения вопроса о возможности принятия изделия ВТ на вооружение (снабжение, эксплуатация, использование по назначению) и постановки на производство.

Опытно-конструкторская работа (ОКР) – комплекс работ (научно-технических, проектных, испытательных, производственно-технологических и организационных) по разработке конструкторской и технологической документации на опытный образец изделия ВТ, изготовлению и испытаниям опытного образца (опытной партии) изделия ВТ, выполняемых при создании (модернизации) изделия ВТ по тактико-техническому заданию государственного заказчика (заказчика).

Составная часть (СЧ) опытно-конструкторской работы – часть ОКР, выполняемая по техническому заданию головного исполнителя ОКР или тактико-техническому заданию заказчика с целью решения отдельных самостоятельных задач создания (модернизации) изделия ВТ (составной части изделия ВТ).

Этап (подэтап) ОКР (СЧ ОКР) – совокупность работ, характеризующаяся признаками их самостоятельного целевого планирования и финансирования, направленная на получение определенных конечных результатов по разработке, проверке и подтверждению соответствия характеристик изделий ВТ (составной части изделия ВТ) установленным требованиям и подлежащая приемке заказчиком.

Тактико-техническое задание на выполнение ОКР (СЧ ОКР) – исходный технический документ, утверждаемый заказчиком ОКР (СЧ ОКР) и устанавливающий комплекс тактико-технических требований к создаваемому изделию ВТ, а также требования к содержанию, объему и срокам выполнения ОКР. Тактико-техническое задание на ОКР определяет цель разработки и назначение разрабатываемого (модернизируемого) образца, совокупность тактико-технических, технических, технико-экономических, специальных и других требований, этапы ОКР (в том числе порядок испытаний и приемки опытных образцов) и, при необходимости, сроки их выполнения. Оно разрабатывается на основе нормативно-технических документов системы общих технических требований к видам техники, стандартов, результатов НИР, технических предложений (если они выполнялись), анализа информационных и патентных материалов, новейших достижений и перспектив развития отечественной и зарубежной науки и техники, опыта предыдущих разработок аналогичных образцов и эксплуатации существующих образцов, исходя из условий обеспечения наиболее эффективного их применения, а также на основе проработок организаций заказчика. При достаточности проработок заказчика и промышленности ТТЗ на ОКР выдают непосредственно, без выполнения НИР и технических предложений. На основании ТТЗ на ОКР в целом, при необходимости, разрабатывают технические задания на составные части ОКР.

Техническое задание на выполнение СЧ ОКР – исходный технический документ, утверждаемый головным исполнителем ОКР и устанавливающий комплекс технических требований к создаваемой составной части изделия ВТ, а также требования к содержанию, объему и срокам выполнения СЧ ОКР.

Головной образец – изделие ВТ, предназначенное для эксплуатации, порядок создания которого аналогичен порядку создания опытного образца изделия ВТ.

Экспериментальный образец ВТ – изделие ВТ, изготовленное для проверки и обоснования основных технических решений, параметров и характеристик в целях обеспечения выполнения требований (параметров и характеристик) тактико-технического задания (ТТЗ, ТЗ) на выполнение опытно-конструкторских работ ОКР (СЧ ОКР).

Макет – упрощенное воспроизведение в определенном масштабе изделия ВТ или его составной части, на котором исследуются отдельные характеристики изделия, а также оценивается правильность принятых технических и конструктивных решений.

Модель – изделие, воспроизводящее или имитирующее конкретные свойства создаваемого изделия или его составной части и изготовленное для проверки принципа их действия и определения отдельных характеристик.

Выделяют типы и виды ВТ: *тип* ВТ охватывает совокупность систем (комплексов) образцов военной техники, объединенных целевым назначением в рамках отдельной задачи рода войск (службы); *вид* ВТ означает принадлежность ВТ к определенному виду оружия, роду войск.

Современная ВТ подразделяется на:

вооружение с его носителями (ракетный комплекс, самолет, танк, корабль военного назначения и т.д.);

технические средства управления войсками и боевыми средствами, технические средства обеспечения боевых действий (боевого, специально-технического, тылового);

технические средства обучения и пропаганды, оборудование научно-исследовательских и испытательных учреждений.

Вооружение, являясь составной частью ВТ, представляет собой технические средства, предназначенные для непосредственного поражения живой силы, ВТ и других объектов противника, и включает оружие (средства доставки и боеприпасы), системы его пуска, наведения, управления и другие технические средства, которыми оснащаются подразделения, части, корабли, соединения различных видов вооруженных сил для ведения боевых действий. Вооружение различают по принадлежности к определенному виду вооруженных сил, роду войск, объединению, соединению, части, подразделению. Отдельные виды вооружения, в свою очередь, подразделяются по принципам действия, назначению, конструктивным особенностям, способам доставки к цели средств поражения и другим признакам. Для выделения из ВТ вооружения в силу его специфики и особой роли как средства поражения применяют выражение «вооружение и ВТ».

Состояние, определяющее степень подготовленности ВТ к использованию ее по назначению при выполнении боевых задач, называется *боеготовностью военной техники*.

Боеготовое изделие – это работоспособное изделие военной техники, имеющее необходимый запас ресурса, приведенное в исходное, установленное эксплуатационной документацией положение или состояние, и подготовленное к выполнению поставленной боевой задачи на использование по назначению. Боеготовность ВТ характеризуется: боеспособностью, надежностью и величиной технического ресурса; наличием подготовленного расчета, боевого комплекта, средств транспортирования и обеспечения; укомплектованностью ЗИПом и эксплуатационной документацией; временем приведения в полную боеготовность в любых условиях обстановки.

Определяющим элементом боеготовности ВТ является ее *боеспособность*, т.е. способность ВТ функционировать с параметрами, установленными эксплуатационной документацией. Боеспособность – способность выполнять боевые задачи в соответствии с предназначением в различных условиях обстановки. Боеспособность ВТ характеризует качественное состояние ВТ и обеспечивается правильной ее эксплуатацией. Она зависит от: укомплектованности личным составом, воору-

жением и военной техникой; уровня боевой выучки личного состава; морально-психологического состояния личного состава; подготовки командира и штаба подразделений, слаженности боевых расчетов; соответствия боевого порядка и боевых возможностей подразделений объему и содержанию боевых задач; эффективности и устойчивости системы управления подразделений; готовности к боевому использованию ВВТ; состояния всех видов обеспечения подразделений.

Живучесть – свойство военной техники сохранять или быстро восстанавливать боеспособность. Живучесть военной техники обеспечивается прочностью конструкций, устойчивостью к воздействию ударной волны, высоких температур, проникающей радиации и т.д. Она вместе со стойкостью определяет способность военной техники выполнять свои функции в условиях воздействия противника, природной среды и сопрягаемых объектов, а также при боевых повреждениях и аварийных ситуациях.

Технический ресурс – это продолжительность функционирования образца военной техники или объем выполненной им работы от начала эксплуатации или ее возобновления после капитального (среднего) ремонта до состояния, когда его дальнейшее использование невозможно. Часто указывается, какой именно технический ресурс имеется в виду: до среднего, капитального, от капитального до ближайшего среднего ремонта и т.п. Если конкретного указания не содержится, то имеется в виду ресурс от начала эксплуатации до достижения предельного состояния после всех ремонтов, т.е. до списания по техническому состоянию. Упорядоченную по определенному замыслу совокупность количественных и качественных характеристик образца военной техники, определявших его свойства (боевые возможности), называют *тактико-техническими характеристиками* (ТТХ). Они задаются в тактико-техническом задании на разработку нового образца военной техники и уточняются в процессе испытаний.

Боевая эффективность – свойство, характеризующее приспособленность процесса применения вооружения для выполнения боевых задач в различных условиях боевой обстановки. Боевая эффективность определяется величиной ущерба, наносимого объектам противника за определенное время при определенных затратах материальных средств с учетом надежности, живучести и боеготовности самого вооружения. Наиболее распространенными показателями боевой эффективности и боевого эффекта являются вероятность достижения ожидаемого результата (например, вероятность поражения объекта, в частности, вероятность поражения воздушной цели одной ракетой) и математическое ожидание некоторой случайной величины, характеризующей эффект (например, математическое ожидание числа уничтоженных целей). Для оценивания эффективности применения средств поражения, кроме того, может рассчитываться максимальный (минимальный) ожидаемый с заданной гарантийной вероятностью ущерба.

Комплексное оценивание боевых, технических, эксплуатационных свойств (возможностей) военной техники и затрат ресурсов, необходимых для ее создания и обеспечения эффективного функционирования, является содержанием *тактико-технико-экономического анализа*. Он осуществляется с применением критерия «эффективность–стоимость», сущность которого состоит в сопоставлении достигнутого или требуемого (планируемого) эффекта и необходимых для этого затрат ресурсов с учетом стоимости разработки, производства и эксплуатации военной техники.

Тактико-технико-экономический анализ составным элементом входит в тактико-технико-экономическое обоснование вооружения, при котором формируются тактико-технические требования к разрабатываемым образцам вооружения, определяющие назначение, боевые возможности, условия эксплуатации и боевого применения образцов с учетом противодействия противника.

Повышение боевой готовности вооруженных сил зависит от качественного решения задач их технического оснащения. Это требует тщательного научного обоснования военно-экономических решений, принимаемых в области военного дела, в том числе и при разработке, испытаниях, производстве и эксплуатации вооружения и военной техники.

1.2. Жизненный цикл образцов ВТ. Военно-научные и научно-технические задачи и проблемы, решаемые на стадиях жизненного цикла ВТ

Весь период времени от замысла о разработке изделия до момента снятия с эксплуатации последнего экземпляра этого изделия составляет его жизненный цикл (ЖЦ).

Жизненный цикл изделия – непрерывный процесс (совокупность взаимоувязанных процессов) последовательного изменения состояния изделия конкретного типа от начала исследования (принятия решения о разработке и ее обоснования) до окончания эксплуатации изделия. Он определяется так же, как период времени от возникновения потребности в системе и ее становления, до снижения эффективности функционирования и или ликвидации системы. Часть жизненного цикла, характеризующаяся определенным состоянием изделия конкретного типа, совокупностью видов предусмотренных работ и их конечными результатами, образует его определенную стадию.

Жизненному циклу (ЖЦ) изделия предшествует этап планирования развития области техники, к которой относится изделие данного типа. Основой этого планирования является программно-целевой метод, при котором реализация планов (программ) обеспечивает достижение заранее определенных целей при выделенных для этого материальных и финансовых ресурсах.

При создании искусственных систем, сложных технических комплексов и организационных систем возникает проблема определения стадий (периодов) жизненного цикла. Примеры трактовки жизненного цикла приведены в табл. 1.1.

История развития понятия ЖЦ наиболее полно рассмотрена в работах В.Н. Спицнаделя, который вводит понятие полного жизненного цикла. Понятие ЖЦ используется в качестве признака структуризации при разработке *методик структуризации целей и функций*. Примеры этапов жизненного цикла для различных видов продукции или услуг – от формирования или прогнозирования потребностей до потребления или поставки заказчику – приведены на рис. 1.1: для производства относительно простых видов продукции (рис. 1.1,а); для производства сложных технических изделий – комплексов (рис. 1.1,б); для разработки автоматизированных систем управления производством – АСУП (рис. 1.1,в); для ремонта сложных изделий или оборудования (рис. 1.1,г); для управленческого решения (рис. 1.1,д).

1. ВООРУЖЕНИЕ И ВОЕННАЯ ТЕХНИКА КАК ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Таблица 1.1

ПАТТЕРН	Поселов	Саркисян	Четвертаков	Яковенко	Спиридачев
Теоретическое исследование	Замысел новой системы	Создание аналога и формирование ТЗ	Формулировка концепции	Исследование	Исследование
Поисковая разработка	Целевые НИР	Создание технической концепции и ее реализация (техпроект, опытный образец, испытания)	Проектирование	Проектно-конструкторские работы, опытно-экспериментальные работы	Проектирование
Перспективная разработка	Конкурсные аванпроектные НИР ОКР	Развертывание серийного производства и подготовка кадров	Освоение	Подготовка производства	Технологический этап
Техническое проектирование	Капитальное строительство	Снятие с серийного производства	Эксплуатация	Освоение и серийное производство	Производство
Производственная готовность	Серийное производство	Снятие с серийного производства и эксплуатации	Модернизация	Эксплуатация	Эксплуатация
	Прекращение производства и снятие с эксплуатации		Ликвидация		Ликвидация

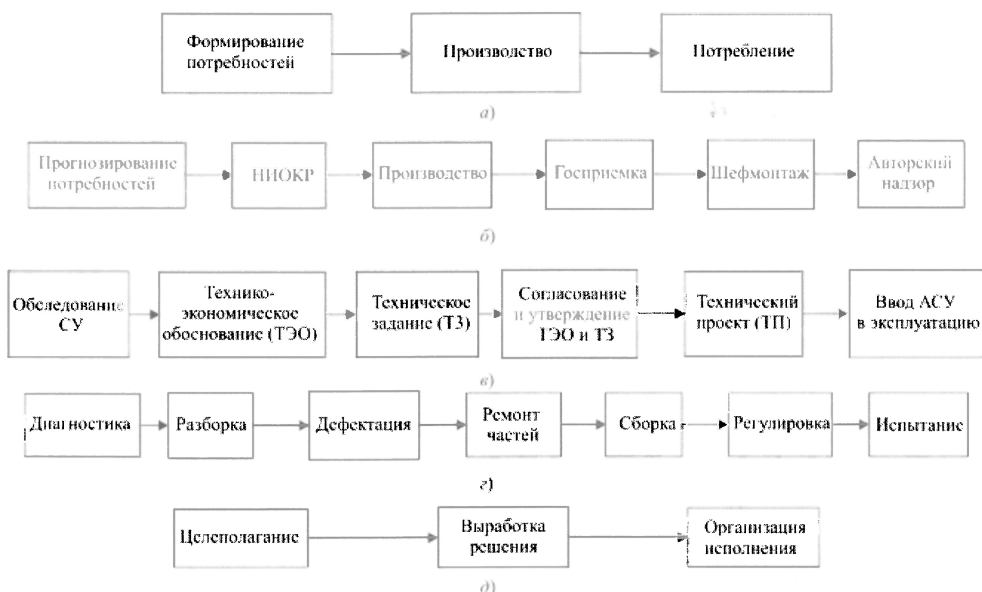


Рис. 1.1. Примеры этапов жизненного цикла для различных видов продукции или услуг

Закономерность историчности учитывается не только пассивно, но и используется для предупреждения «смерти» системы путем реконструкции, реорганизации системы для сохранения ее в новом качестве. При создании сложных технических комплексов предлагается корректировать технический проект с учетом старения идеи, положенной в его основу, уже в процессе проектирования и создания системы; рекомендуют при создании технической документации, сопровождающей систему, включать в нее не только этапы разработки и эксплуатации системы, но и срок жизни (ликвидацию). При разработке АСУП рекомендовалось примерно в середине периода проектирования предшествующей очереди развития АСУП начинать концептуальное проектирование и формирование технического задания на проектирование последующей очереди АСУП. Проводятся более глубокие исследования жизненного цикла с учетом природных циклов. Прогнозируются точки начала спада эффективности и вывода системы на новый уровень ее развития.

Этапы жизненного цикла от формирования требований к продукции до окончания ее эксплуатации определяются различными стандартами. Основным документом, определившим процессы создания информационных систем и программного обеспечения является международный базовый стандарт ISO/IEC 12207: 1995-08-01. Стандарт процессов жизненного цикла ориентирован на различные виды программного обеспечения (ПО) и типы проектов автоматизированных систем, в которых ПО является одной из составных частей. Стандарт определяет стратегию и общий порядок создания и эксплуатации ПО, он охватывает жизненный цикл от концептуализации идей до завершения проекта. Целесообразность совместного использования стандартов на информационные системы и на ПО обуславливается одним из поло-

жений ISO 12207, согласно которому процессы, протекающие во время жизненного цикла ПО, должны быть совместимы с процессами, протекающими во время жизненного цикла автоматизированной системы. При этом стандарт ISO/IEC 12207 не конкретизирует в деталях методы выполнения действий и решения задач, входящих в процессы (стадии) жизненного цикла информационной системы (программного обеспечения), а лишь описывает структуры этих процессов, которые являются общими для любых моделей жизненного цикла, методологий и технологий разработки. Модель ЖЦ зависит от специфики изделия (системы) и условий, в которых она создается и функционирует. Существуют *три стратегии конструирования*:

1) однократный проход (водопадная стратегия) — линейная последовательность этапов конструирования;

2) инкрементная стратегия — в начале процесса определяются все пользовательские и системные требования, оставшаяся часть конструирования выполняется в виде последовательности версий (первая версия реализует часть запланированных возможностей, следующая версия реализует дополнительные возможности и т. д., пока не будет получена полная система);

3) эволюционная стратегия — строится в виде последовательности версий (итераций), но в начале процесса определены не все требования (они уточняются в результате разработки версий).

К настоящему времени наибольшее распространение получили две основные модели жизненного цикла:

1) каскадная модель — модель водопада (waterfall) — автор Уинстон Ройс, 1970;

2) спиральная модель (эволюционная стратегия конструирования) — автор Барри Бозм, 1988.

Очень часто классический жизненный цикл называют каскадной или водопадной моделью, подчеркивая, что разработка рассматривается как последовательность этапов, причем переход на следующий, иерархически нижний этап, происходит только после полного завершения работ на текущем этапе (рис. 1.1).

За десятилетия существования каскадной модели разбиение работ на стадии и названия этих стадий менялись. Кроме того, наиболее разумные методики и стандарты избегали жесткого и однозначного приписывания определенных работ к конкретным этапам. Тем не менее, все же можно выделить ряд устойчивых этапов разработки, практически не зависящих от предметной области (рис. 1.2): проектирование; разработка; тестирование и опытная эксплуатация; сдача готового продукта и сопровождение.

Подразумевается, что разработка начинается на системном уровне и проходит через анализ, проектирование, разработку (кодирование), тестирование и сопровождение. При этом моделируются действия стандартного инженерного цикла.

Системный анализ задает роль каждого элемента в системе, взаимодействие элементов друг с другом. Поскольку ПО является лишь частью большой системы, то анализ начинается с определения требований ко всем системным элементам и назначения подмножества этих требований программному «элементу». Необходимость системного подхода явно проявляется, когда формируется интерфейс ПО с другими элементами (аппаратурой, людьми, базами данных). На этом же этапе на-

чинается решение задачи планирования проекта ПО. В ходе планирования проекта определяются объем проектных работ и их риск, необходимые трудозатраты, формируются рабочие задачи и план-график работ.

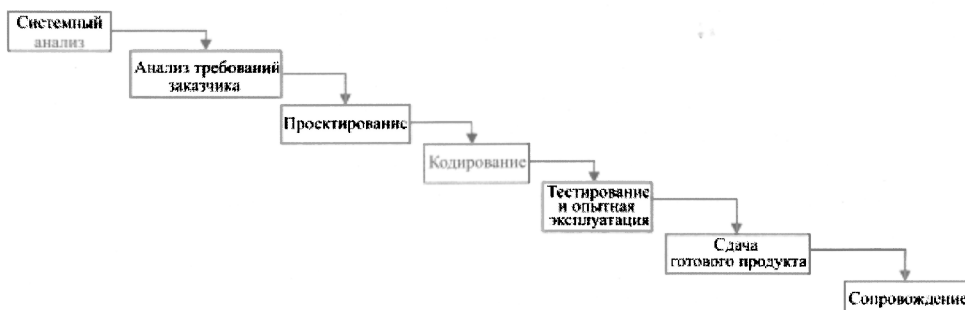


Рис. 1.2. Каскадная модель разработки

Анализ требований заказчика относится к программному элементу – программному обеспечению. Уточняются и детализируются его функции, характеристики и параметры входного и выходного интерфейса (входных и выходных форм данных). Здесь же завершается решение задачи планирования проекта.

Исходные данные для *проектирования* содержатся в спецификации анализа, т.е. в ходе проектирования выполняется трансляция требований к ПО во множество проектных представлений. При этом основное внимание уделяется качеству будущего программного продукта.

Кодирование состоит в переводе результатов проектирования в текст на языке программирования.

Тестирование – выполнение программы для выявления дефектов в функциях, логике и форме реализации программного продукта.

После успешного тестирования происходит *сдача готового продукта*.

Сопровождение – это внесение изменений в эксплуатируемое ПО. Цели изменений: исправление ошибок; адаптация к изменениям внешней для ПО среды; усовершенствование ПО по требованиям заказчика. Сопровождение ПО состоит в повторном применении каждого из предшествующих шагов (этапов) жизненного цикла к существующей программе, но не в разработке новой программы.

В зависимости от характера организационно-технических мероприятий и содержания процессов изменения состояния изделий для классического (типового) ЖЦ изделий ВТ выделяют стадии, показанные на рис. 1.3.

Часть цикла от замысла о разработке до производства является *реализационным периодом* ЖЦ, а его часть от начала производства до снятия с эксплуатации – *периодом полезной жизни изделия*.

Типовое содержание процессов изменения состояния изделий для различных стадий жизненного цикла может быть представлено следующим образом:

1) исследование и обоснование разработки изделия – формирование уровня качества изделий, соответствующего современным достижениям научно-техничес-

кого прогресса, тенденциям развития изделий по данным отечественной и зарубежной информации; изыскание принципов и путей, обоснование возможности и целесообразности создания изделий;

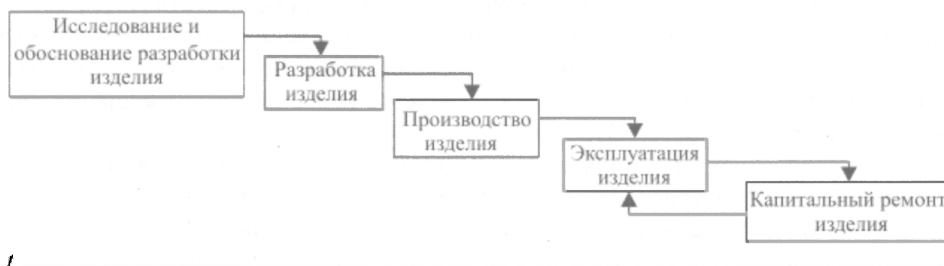


Рис.1.3. Взаимосвязь стадий классического жизненного цикла изделий по времени выполнения работ

2) разработка изделия – разработка рабочей конструкторской документации (РКД), технологической документации (ТД) для изготовления и испытаний опытного (головного) образца (опытной партии), изготовление опытного образца изделия, проведение предварительных и приемочных (государственных, межведомственных) испытаний, корректировка РКД, ТД и доработка опытного образца изделия по результатам приемочных испытаний; утверждение РКД и ТД для организации серийного (массового) производства и изготовления изделий (установочной серии);

3) производство изделия – организация промышленного изготовления изделий на производственном объединении или промышленном предприятии, их изготовление в соответствии с плановыми заданиями и с уровнем качества, сформированным на стадии «разработка», а также повышении качества изделий на основе опыта эксплуатации и путем улучшения и совершенствования технологии производства и конструкции изделий при соблюдении установленных технических показателей;

4) эксплуатация изделий – ввод (приемка) в эксплуатацию изделий, прошедших сборку и наладку и (или) строительство, монтаж и наладку и испытания на месте их эксплуатации; приведение изделий в установленную степень готовности к применению по назначению, обеспечивающую перевод в состояние для последующих действий; поддержание изделий в установленной степени готовности к применению по назначению в течение установленных сроков; применение изделий по назначению в соответствии с их функциональным назначением; хранение изделий в заданном состоянии и обеспечение сохраняемости в течение установленных сроков; перевозка изделий с использованием транспортных средств;

5) капитальный ремонт изделия – разработка рабочих конструкторских документов, предназначенных для подготовки ремонтного производства, ремонта и контроля изделий после ремонта; организация капитального ремонтного производства изделий на ремонтном предприятии заказчика и (или) промышленности, восстановление уровня качества изделий, их тактико-технических (технических) параметров и характеристик, изменяющихся при эксплуатации и определяющих возможность использования изделий по назначению; обеспечение соответствия отре-

монтированных изделий техническим требованиям, показателям и нормам, установленным в ремонтных документах; обеспечение межремонтных сроков (ресурсов) отремонтированных изделий.

Изыскание путей и обоснование разработки изделия осуществляется при выполнении проработок заказчика и промышленности, прикладных научно-исследовательских работ (НИР) и технического предложения, а доведение их результатов до условий промышленного освоения реализуется посредством выполнения опытно-конструкторской работы (ОКР).

При проработках заказчика и промышленности выполняются работы по формированию исходных требований к изделиям и их составным частям в соответствии с фундаментальными и поисковыми НИР, отечественной и зарубежной информацией о достижениях науки и техники, а также тенденциями развития изделий. Вместе с этим осуществляется разработка и выдача заказчиком соответствующих заданий промышленности.

Прикладные НИР включают комплекс теоретических и экспериментальных исследований, проводимых по единому исходному техническому документу с целью изыскания перспективных принципов и путей создания новой и совершенствования существующей техники и исследования вопросов ее эксплуатации и применения по назначению.

Исходный технический документ заказчика, называемый *тактико-техническим заданием* (ТТЗ) на НИР, устанавливает комплекс требований к содержанию, объему и срокам проведения работы в целом. Разработка ТТЗ на НИР ведется на основе тактико-техничко-экономического анализа состояния исследуемого вопроса, опыта эксплуатации и применения техники по назначению, результатов выполнения фундаментальных исследований и других научно-исследовательских и экспериментальных работ, новейших достижений и перспектив развития отечественной науки и техники в данной области. Тактико-техническое задание на НИР состоит из следующих основных разделов:

- основание для выполнения НИР;

- цели и задачи НИР;

- требования к выполнению НИР;

- тактико-технические (технические) требования к образцу, предполагаемому к разработке (модернизации);

- этапы НИР;

- требования к разрабатываемой документации; порядок приемки работ и т.д.

Техническое предложение представляет собой комплекс теоретических, экспериментальных и проектных работ, предшествующих проведению ОКР по разработке сложного образца техники, требующего решения крупных научно-технических проблем и значительных материальных и финансовых затрат, или изделий массового применения. Техническое предложение выполняется проектно-конструкторскими и научно-исследовательскими организациями промышленности. Исходным документом для разработки технического предложения является ТТЗ заказчика на выполнение технического предложения по обоснованию возможности и целесообразности разработки образца техники. В общем случае при разработке технических предложе-

ний проводится выявление и анализ вариантов возможных решений, а также выбор целесообразного варианта (вариантов) построения изделия.

Основным видом работ на стадии разработки является ОКР создания изделия, включающее выполнение в необходимом объеме проектной и рабочей конструкторской документации, опытную проверку принятых технических решений и отработку этих решений в соответствии с потребностями производства и эксплуатации образцов техники. Опытно-конструкторская разработка проводится так же, как и разработка изделия по каскадной схеме, и состоит из следующих этапов:

- разработка эскизного проекта ОКР;
- разработка технического проекта ОКР;
- разработка рабочей конструкторской документации для изготовления опытного образца;
- изготовление опытного образца и проведение предварительных испытаний;
- проведение государственных испытаний опытного образца (опытной партии);
- корректировка рабочей конструкторской документации и доработка опытного образца по результатам государственных испытаний.

Действующая в настоящее время последовательность изменения состояния изделия ВТ от принятия решения о разработке, обосновании разработки до окончания разработки изделия в ходе ОКР представлена на рис. 1.4.

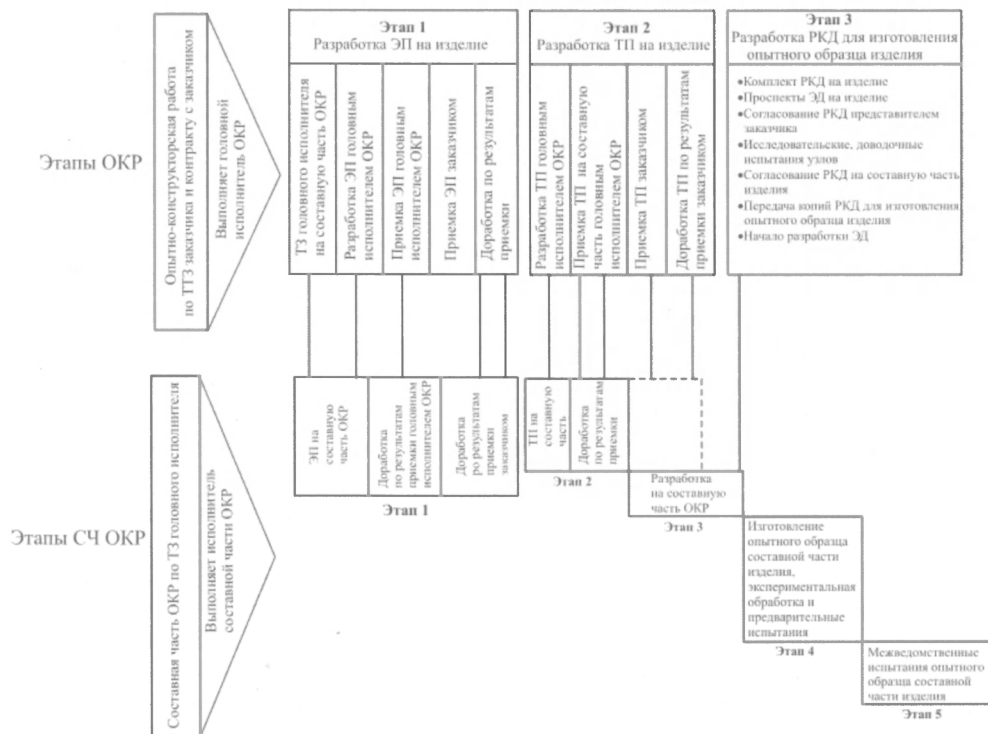


Рис. 1.4. Схема взаимосвязи этапов ОКР и этапов СЧ ОКР

В зависимости от характера и сложности ОКР и степени предварительной проработки темы, отдельные этапы, кроме предварительных и государственных испытаний, могут быть исключены. При этом в случае отсутствия этапа разработки эскизного (технического) проекта работы, предусмотренные этим этапом, выполняются на этапе разработки технического (эскизного) проекта.

Эскизный проект разрабатывается с целью установления принципиальных (конструктивных, схемных и др.) решений, дающих общее представление о принципе работы и (или) устройстве изделия, когда это целесообразно сделать до разработки технического проекта или рабочей конструкторской документации для изготовления опытного образца. На этапе эскизного проектирования проводится сравнительное оценивание рассматриваемых вариантов изделия по его показателям качества и выбирается целесообразный вариант (варианты) для дальнейшей проработки. Основные решения проверяются экспериментально на макетах и путем моделирования на аналоговых и цифровых вычислительных машинах. Разрабатывается и выпускается эскизная техническая документация, включающая схемную, конструкторскую, монтажную и текстовую документацию.

Технический проект завершает проектирование образца. Он представляет собой совокупность конструкторских документов, которые содержат технические решения, дающие полное представление об устройстве изделия и исходные данные для разработки рабочей конструкторской документации, необходимой для изготовления и проведения испытаний опытного образца. Она корректируется по результатам изготовления этого образца и его предварительных и государственных испытаний. Целью корректировки является подготовка документации для серийного производства изделия.

Испытания опытных образцов проводятся для проверки их соответствия требованиям тактико-технического задания, действующей нормативно-технической документации и для обоснования предложений о возможности принятия разрабатываемого изделия, эксплуатацию или постановки его на производство. Объем и порядок проведения испытаний определяются программами и методиками испытаний.

Если планом разработки не предусматривается изготовление опытного образца, а его функции возлагаются на первый предполагаемый к вводу в эксплуатацию образец, то этап разработки заканчивается принятием этого первого образца в эксплуатацию. В дальнейшем такой первый в серии образец именуется *головным образцом*, а в том случае, если он является единственным в изготовлении, – *единичным образцом*.

Высокий уровень качества и требуемая эффективность применения сложных изделий по назначению обеспечиваются только при принятии обоснованных решений оперативно-тактического, тактико-технического, военно-экономического и организационного характера на всех стадиях их жизненного цикла. Поэтому на протяжении всего жизненного цикла образцов военной техники проводятся военнотехнические исследования с целью получения информации, необходимой для принятия достаточно обоснованных разнообразных решений. Неверное или недостаточно проработанное и обоснованное решение на какой-либо стадии жизненного цикла или даже на отдельном этапе некоторой стадии сказывается на всех последующих стади-

ях или этапах. Особенно важны решения, принятые на первых двух стадиях: 1) стадии изыскания путей и обоснования разработки образца вооружения; 2) стадии непосредственной его разработки в процессе выполнения опытно-конструкторской работы. На этих стадиях ведутся поисковые, проектно-исследовательские и проектные работы, а также испытания опытных образцов изделий. Качество и степень обоснованности принятых здесь решений определяют эффективность применения, стоимость и эксплуатационные свойства будущего изделия, продолжительность полезной части его жизненного цикла.

Весьма важным является научно-техническое и организационное обеспечение ввода в эксплуатацию как применение по назначению вновь разработанных изделий. Высокое качество выполнения всех указанных мероприятий может быть достигнуто лишь при наличии специально организованного непрерывного научно-технического сопровождения сложных изделий техники в течение всего их жизненного цикла.

Под *научно-техническим сопровождением изделия* понимают процесс планирования и выполнения заказчиком в тесном взаимодействии с предприятиями разработчика и изготовителя, монтажными и другими организациями промышленности научных, технических и организационных мероприятий, направленных на эффективное и своевременное решение задач обоснования требований, разработки, испытаний, постановки на производство, внедрения в эксплуатацию, выявления направлений совершенствования и модернизации изделия и других задач, требующих целенаправленных действий по управлению качеством изделия на всех стадиях его жизненного цикла.

Совокупность задач, решаемых при научно-техническом сопровождении, можно представить двумя большими и взаимосвязанными группами задач.

1. Научно-исследовательские задачи имеют целью в результате исследований получить научно обоснованные данные, необходимые для принятия решений оперативно-тактического, тактико-технического, военно-экономического и организационного характера, а также информационно и методически поддержать выполнение мероприятий по формированию, обеспечению и поддержанию необходимого уровня качества изделий и других мероприятий по техническому обеспечению, проводимых в течение жизненного цикла изделий.

2. Организационно-технические задачи связаны с реализацией организационно-технических мероприятий по взаимоувязанному изменению состояния изделия от начала исследования и обоснования его разработки до окончания эксплуатации, включая пуско-наладочные работы на месте дислокации и ввод в эксплуатацию изделия в целом, накопление опыта работы с изделием, установление его предельных возможностей, расширение функций при совершенствовании и модернизации изделия и т.п. Таким образом, научно-техническое сопровождение как процесс, протекающий во времени, может быть представлен двумя продолжительными периодами, один из которых связан с реализационным периодом жизненного цикла, а второй – с периодом полезной жизни изделия.

В целом научно-техническое сопровождение сложных изделий требует выполнения разнообразных научных исследований и проведения значительного числа

организационно-технических мероприятий, связанных с управлением качеством изделий и с вопросами эффективного применения их по назначению. Эти исследования и мероприятия обеспечивают решение ряда задач, важнейшими из которых являются:

- обоснование требований к изделию с целью формирования корректного тактико-технического задания на его разработку;

- выбор рациональной структуры и параметров изделия, обеспечивавших достижение значений показателей его применения по назначению не хуже заданных при практически реализуемых прогрессивных технических решениях и приемлемых затратах ресурсов;

- проверка качества функционирования изделия и соответствия его показателей назначения требованиям тактико-технического задания;

- определение предельных возможностей изделия;

- выбор эффективных способов применения изделия по назначению в различных условиях обстановки, включая воздействия природной среды, взаимодействующих систем и систем активного противодействия противника;

- определение целесообразности и направлений совершенствования и модернизации изделия.

Каскадная модель хорошо зарекомендовала себя при выполнении различного рода инженерных разработок и получила широкое распространение. Изначально она разрабатывалась для решения различного рода инженерных задач и не потеряла своего значения для прикладной области до настоящего времени. Кроме того, каскадный подход хорошо зарекомендовал себя при разработке определенных информационных систем, для которых в самом начале разработки можно достаточно точно и полно сформулировать все требования с тем, чтобы предоставить разработчикам свободу выбора реализации, наилучшей с технической точки зрения. К таким информационным системам, в частности, относятся сложные расчетные системы, системы реального времени, создаваемые в том числе, в виде образцов ВТ (например, АСУ и КСА). Однако, как и любая инженерная схема, классический жизненный цикл имеет достоинства и недостатки.

Достоинства классического жизненного цикла:

- на каждом этапе формируется законченный набор проектной документации, отвечающей критериям полноты и согласованности. На заключительных этапах также разрабатывается пользовательская документация, охватывающая все предусмотренные стандартами виды обеспечения информационной системы (организационное, методическое, информационное, программное, аппаратное);

- выполняемые в логичной последовательности этапы работ позволяют планировать сроки завершения и соответствующие затраты в соответствии с временным графиком по всем этапам проекта, упорядочивает ход конструирования.

Тем не менее, несмотря на все свои достоинства, каскадная модель имеет ряд недостатков, ограничивающих ее применение при разработке информационных систем, причем эти недостатки либо делают ее полностью неприменимой, либо приводят к увеличению сроков разработки и стоимости проекта. В настоящее время многие неудачи программных проектов объясняются именно последовательным

процессом разработки. Перечень недостатков каскадной модели при ее использовании для разработки информационных систем будет рассмотрен ниже.

Недостатки классического жизненного цикла:

реальные проекты часто требуют отклонения от стандартной последовательности шагов;

цикл основан на точной формулировке исходных требований к изделию (реально в начале проекта требования заказчика определены лишь частично);

результаты проекта доступны заказчику только в конце работы, что приводит к существенной задержке в получении результатов;

ошибки и недоработки на любом из этапов проявляются, как правило, на последующих этапах работ, что приводит к необходимости возврата назад;

сложность параллельного ведения работ по проекту;

чрезмерная информационная перенасыщенность каждого из этапов;

сложность управления проектом;

высокий уровень риска и ненадежность инвестиций.

Достаточно часто заказчик не может сформулировать подробные требования по вводу, обработке или выводу данных для будущего программного продукта. С другой стороны, разработчик может сомневаться в приспособляемости продукта под операционную систему или аппаратную платформу изделия, форме диалога с пользователем или в эффективности реализуемого алгоритма. В этих случаях целесообразно использовать макетирование (относится к инкрементной стратегии конструирования).

Основная цель макетирования – снять неопределенности в требованиях заказчика.

В ходе выполнения прикладных НИР и технического проектирования при реализации каскадной модели жизненного цикла могут проводиться испытания макетов, моделей, экспериментальных образцов и материалов. Общая схема процесса разработки при макетировании представлена на рис. 1.5.



Рис. 1.5. Общая схема процесса разработки при макетировании

Макетирование (прототипирование) – это процесс создания модели требуемого программного продукта. Модель может принимать одну из трех форм:

1) бумажный макет или макет на основе ПК (изображает или рисует человеко-машинный диалог);

2) работающий макет (выполняет некоторую часть требуемых функций);

3) существующая программа (характеристики которой затем должны быть улучшены).

Последовательность действий при макетировании представлена на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Последовательность действий при макетировании

Макетирование начинается со сбора и уточнения требований к создаваемому изделию. Разработчик и заказчик определяют все цели изделия, устанавливают, какие требования известны, а какие предстоит доопределить. Затем выполняется быстрое проектирование. В нем внимание сосредоточивается на тех характеристиках изделия, которые должны быть видимы пользователю. Быстрое проектирование приводит к построению макета изделия. Макет оценивается заказчиком и используется для уточнения требований к изделию. Итерации повторяются до тех пор, пока макет не выявит все требования заказчика и, тем самым, не даст возможность разработчику понять, что должно быть сделано.

Достоинство макетирования – обеспечивает определение полных требований к изделию.

Недостатки макетирования – заказчик может принять макет за изделие; разработчик может принять макет за изделие.

Когда заказчик видит работающую версию изделия, он перестает сознавать, что детали макета скреплены «жевательной резинкой и проволокой»; он забывает, что в погоне за работающим вариантом оставлены нерешенными вопросы качества и удобства сопровождения изделия. Когда заказчику говорят, что продукт должен быть перестроен, он начинает возмущаться и требовать, чтобы макет «в три приема» был превращен в рабочее изделие. Очень часто это отрицательно сказывается на управлении разработкой изделия. Однако для быстрого получения работающего макета разработчик часто идет на определенные компромиссы (например, могут

использоваться не самый подходящий язык программирования или операционная система). Для простой демонстрации возможностей может применяться неэффективный алгоритм. Спустя некоторое время разработчик забывает о причинах, по которым эти средства не подходят. В результате далеко не идеальный выбранный вариант интегрируется в систему.

Сочетание лучших свойств классического жизненного цикла и макетирования, к которым добавляется новый элемент – анализ риска отражено в *спиральной модели* (рис. 1.7). На рисунке: 1 – начальный сбор требований и планирование проекта; 2 – та же работа, но на основе рекомендаций заказчика; 3 – анализ риска на основе начальных требований; 4 – анализ риска на основе реакции заказчика; 5 – переход к комплексной системе; 6 – начальный макет системы; 7 – следующий уровень макета; 8 – сконструированная система; 9 – оценивание заказчиком. Спиральная модель относится к эволюционной (итерационной) стратегии конструирования.

Как показано на рис. 1.7, модель определяют четыре действия, представляемые четырьмя квадрантами спирали:

- 1) планирование – определение целей, вариантов и ограничений;
- 2) анализ риска – анализ вариантов и распознавание/выбор риска;
- 3) конструирование – разработка продукта следующего уровня;
- 4) оценивание – оценка заказчиком текущих результатов конструирования.



Рис. 1.7. Спиральная модель

Интегрирующий аспект спиральной модели очевиден при учете радиального измерения спирали. С каждой итерацией по спирали (продвижением от центра к периферии) строятся все более полные версии изделия. Каждый виток спирали соответствует созданию фрагмента или версии изделия, на нем уточняются цели и характеристики, определяется качество изделия, планируются работы на следующем витке спирали. На каждой итерации углубляются и последовательно конкретизируются детали проекта, в результате чего выбирается обоснованный вариант, ко-

торый доводится до окончательной реализации. Использование спиральной модели позволяет осуществлять переход на следующий этап выполнения проекта, не дожидаясь полного завершения текущего этапа – недоделанную работу можно будет выполнить на следующей итерации. Главная задача каждой итерации – как можно быстрее создать работоспособное изделие для предъявления его в эксплуатацию.

В первом витке спирали определяются начальные цели, варианты и ограничения, распознается и анализируется риск. Если анализ риска показывает неопределенность требований, на помощь разработчику и заказчику приходит макетирование (используемое в квадранте конструирования). Для дальнейшего определения проблемных и уточненных требований может быть использовано моделирование. Заказчик оценивает инженерную (конструкторскую) работу и вносит предложения по модификации (квадрант оценки заказчиком). Следующая фаза планирования и анализа риска базируется на предложениях заказчика. В каждом цикле по спирали результаты анализа риска формируются в виде «продолжать, не продолжать». Если риск слишком велик, проект может быть остановлен. В большинстве случаев движение по спирали продолжается, с каждым шагом продвигая разработчиков к более общей модели системы.

В каждом цикле по спирали требуется конструирование (нижний правый квадрант), которое может быть реализовано классическим жизненным циклом или макетированием. Заметим, что число действий по разработке (правый нижний квадрант) возрастает по мере продвижения от центра спирали.

Д о с т о и н с т в а с п и р а л ь н о й м о д е л и :

наиболее реально (в виде эволюции) отображает разработку изделия (постепенная непрерывная интеграция отдельных элементов изделия в единое целое);

позволяет явно учитывать риск на каждом витке эволюции разработки, что приводит к его уменьшению;

включает шаг системного подхода в итерационную структуру разработки;

использует моделирование для уменьшения риска и совершенствования изделия;

большая гибкость в управлении проектом за счет возможности внесения тактических изменений в разрабатываемое изделие;

упрощает повторное использование и совершенствование компонентов изделия, разработанных на ранних стадиях;

модель позволяет получить более надежную и устойчивую систему. Это связано с тем, что по мере развития системы ошибки и слабые места обнаруживаются и исправляются на каждой итерации с возможной корректировкой критических параметров эффективности;

возможность совершенствования процесса (организации) разработки на последующих итерациях.

Н е д о с т а т к и с п и р а л ь н о й м о д е л и :

новизна (отсутствует достаточная статистика эффективности модели);

повышенные требования к заказчику;

трудности контроля и управления временем разработки (определение момента перехода на следующий этап).

Зависимость рисков от времени разработки в двух моделях представлена на рис. 1.8.

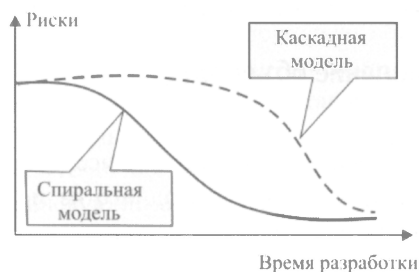


Рис. 1.8. Зависимость рисков от времени разработки

По мере продвижения разработки снижение ожидаемого уровня рисков в спиральной модели происходит с наибольшей скоростью по отношению к каскадной модели.

Основой технической подготовки производства изделий является конструкторская и технологическая подготовка. В совокупности с НИР они составляют *этап создания изделия*, на котором формируется качество продукции. На данном этапе должно обеспечиваться также рациональное сочетание интересов заказчика, разработчика, изготовителя и потребителя.

Главной задачей этапа создания изделия является создание изделия высокого технического уровня при одновременном сокращении цикла и снижении трудоемкости процессов разработки и освоения новой техники, повышении гибкости производства.

На создание продукции высокой эффективности направлены комплексы стандартов, прежде всего межгосударственных: система разработки и постановки продукции на производство (СРПП); единая система конструкторской документации (ЕСКД); единая система технологической документации (ЕСТД); система автоматизированного проектирования (САПР).

Велика роль системы СРПП в формировании качества продукции на стадиях проектирования и начальных этапах производства продукции. Роль проектирования в обеспечении качества продукции видна из данных Европейской организации по качеству: при оценке причин отказов действует правило «70–20–10», согласно которому 70% отказов происходят из-за недостатков проектирования, 20% – из-за некачественного изготовления и 10% – из-за нарушения правил эксплуатации.

В стандартах СРПП регламентирован порядок работы на двух этапах технической подготовки:

- 1) при разработке продукции – процессов создания образцов и технической документации, необходимых для организации промышленного производства;
- 2) постановке продукции на производство – совокупности мероприятий по организации промышленного производства.

В группу стандартов, обеспечивающих качество продукции на стадии эксплуатации входят стандарты на эксплуатационные документы (ЭД) – руководства

по эксплуатации, паспорта, этикетки. Основопологающим стандартом является ГОСТ 2.601 «ЕСКД. Эксплуатационные документы». В нем определяются требования к структуре и содержанию ЭД на изделия сложной техники.

1.3. Системное представление объектов исследований

При системном подходе к исследованию объект исследования представляется как система. Рассмотрим понятие системы как одного из методологических понятий, когда представление объекта исследования как системы или отказ от такого представления определяется не функциями объекта, а зависит от характера и задачи исследования. В соответствии с последним положением и система военной техники, и комплекс, и образец в равной степени относятся к системам, если их исследование ведется с системных позиций.

1.3.1. Понятие системы. Основные свойства и классификация

Понятие «система» базируется на множестве взаимосвязанных компонентов (элементов, подсистем), составляющих ограниченный в окружающей их внешней среде и взаимодействующий с ней объект. Это множество образует единое целое – изъятие какого-либо подмножества элементов нарушает свойство целостности. Это единое целое имеет определенную цель или назначение, характерное для всей совокупности элементов, а не какой-нибудь комбинации из них;

каждый элемент множества выполняет определенную функцию, способствующую достижению цели, выполнению общесистемных функций.

Невозможно сразу дать представление системе (объекту), показав ее, изобразив графически или описав ее математическим выражением. Существует несколько десятков определений понятия системы. Вот два из них.

Система – это множество элементов, объединенных структурно и функционально таким образом, чтобы обеспечить на заданном множестве условий достижение некоторых целей при ограниченных ресурсах и времени;

система – это совокупность элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которая образует целостность, единство.

Анализ показывает, что определение понятия система изменялось по мере развития теории систем не только по форме, но и по содержанию. Сопоставляя эволюцию определения системы (*элементы* и *связи*, затем – *цель*, затем – *наблюдатель*) и эволюцию использования категорий теории познания, можно обнаружить сходство: вначале модели (особенно формальные) базировались на учете только элементов и связей, взаимодействий между ними, затем стало уделяться внимание цели, поиску методов ее формализованного представления (целевая функция, критерий функционирования и т.п.), в дальнейшем, все большее внимание обращается на наблюдателя, лицо, осуществляющее моделирование или проводящее эксперимент, т.е. лицо, принимающее решение. С учетом этого и опираясь

на более глубокий анализ сущности понятия системы, следует относиться к этому понятию как к категории теории познания, теории отражения.

Рассматривая различные определения системы и их эволюцию и не выделяя ни одно из них в качестве основного, можно не только обратить внимание на то, что сложно кратко определить такие (обычно интуитивно постигаемые) понятия, как система, но и осознать тот факт, что на разных этапах представления объекта в виде системы, в различных конкретных ситуациях можно пользоваться разными определениями, причем по мере уточнения представлений о системе или при переходе на другую ступень (многоуровневую иерархическую структуру) ее исследования определения системы не только может, но и должно уточняться.

Определение, включающее и *элементы*, и *связи*, и *цель*, и *наблюдателя*, а иногда и его «язык» отображения системы, помогает поставить задачу, наметить основные этапы методики системного анализа. Например, в организационных системах, если не определить лицо, компетентное принимать решения, то можно и не достичь цели, ради которой создается система. Но есть системы, для которых наблюдатель очевиден. Иногда не нужно даже в явном виде использовать понятие цели (например, для исследования относительно невысоко развитых биологических объектов типа растений).

Таким образом, при проведении системного анализа нужно, прежде всего, отобразить ситуацию с помощью как можно более полного определения системы, а затем, выделив наиболее существенные компоненты, влияющие на принятие решения, сформулировать «рабочее» определение, которое может уточняться, расширяться или сужаться в зависимости от хода анализа. Рабочее определение системы помогает исследователю (разработчику) начать ее описание. Далее, для того чтобы правильно выбирать необходимые элементы, связи, их свойства и другие составляющие, входящие в принятое рабочее определение системы, нужно, чтобы лица, формирующие это первоначальное определение, вербальное представление системы, в одинаковом смысле использовали эти понятия.

Выбор определения системы отражает принимаемую концепцию и является фактически началом моделирования. Поэтому с самого начала целесообразно представлять определения в символической форме, способствующей более однозначному пониманию ее всеми участниками разработки или исследования системы.

Взгляд на определения системы как на средство начала ее исследования и стремление сохранить целостность при преобразовании или проектировании позволяет дать определение, в котором система не расчленяется на самые элементарные частицы (т. е. не разрушается полностью), а представляется как совокупность укрупненных компонентов, принципиально необходимых для существования и функционирования исследуемой или создаваемой системы:

$$S_{\text{def}} = \langle \{Z\}, \{\text{Str}\}, \{\text{Tech}\}, \{\text{Cond}\}, \{\exists\} \rangle,$$

где $\{Z\}$ – совокупность или структура целей (планов); $\{\text{Str}\}$ – совокупность структур (производственная, организационная, информационная и т. п.), реализующих

цели; {Tech} – совокупность технологий (методы, средства, алгоритмы, процессы и т. п.), реализующих систему; {Cond} – условия существования системы (внутренние и внешние ресурсы, ограничения и помехи и т.п.), т.е. факторы, влияющие на ее создание, функционирование и развитие; {Э} – эффект, который возможно получить в результате функционирования системы.

Это определение позволяет не разрушать исследуемую систему, а сохранять в ней основные ее структуры, преобразуя и развивая их в соответствии с поставленными целями, а при создании новой системы помогает создать целостную концепцию ее проектирования, реализовать целевой подход к созданию системы. Число элементов, учитываемых в определении, можно увеличивать в определении до необходимого для решаемой задачи.

Использование теоретико-множественных представлений при моделировании систем позволяет организовать взаимодействие и взаимопонимание между специалистами различных областей знаний. С их помощью можно записать различные определения системы, и выбрать из них то, которое в наибольшей степени отражает концепцию исследователей, проектировщиков.

Конкретная система при первоначальном описании может быть отображена теоретико-множественной формулой, включающей наборы различных элементов (например, A, B, C), отношений между ними (R), которые могут быть также разделены на подмножества (R_1, R_2, R_3 и т.д.) свойств элементов Q_a, Q_b, Q_c и свойств отношений Q_r , могут быть учтены множества входных воздействий X и выходных результатов Y :

$$S = \langle A, B, C, R, Q_a, Q_b, Q_c, X, Y \rangle.$$

Затем, по мере накопления сведений о системе, теоретико-множественная формула может измениться и отразить взаимоотношения между группами множеств:

$$S = \langle \{x_i\} R_1 \{a_j\} R_2 \{b_k\} R_3 \{c_l\} \rangle,$$

а в дальнейшем описание может уточняться: могут быть введены подмножества и отношения между ними и их элементами; деление на подмножества может быть повторено неоднократно, и, таким образом, с помощью теоретико-множественных представлений может быть отображена многоуровневая структура; отношения могут быть уточнены в виде набора правил преобразования множеств или подмножеств.

При использовании теоретико-множественных представлений в принципе можно вводить любые отношения, однако при произвольных отношениях в формализованном с их помощью описании проблемной ситуации довольно быстро могут обнаружиться неразрешимые противоречия – *парадоксы*, *апарии* или *антиномии*, что не позволяет оперировать с получаемыми теоретико-множественными моделями таким же образом, как с классическими математическими соотношениями, гарантируя достоверность получаемых результатов.

Таким образом, рассматривая различные определения системы и их эволюцию и не выделяя ни одного из них в качестве основного, акцентируется сложность крат-

кого определения понятия системы, поэтому на разных этапах представления объекта в виде системы и его изучения можно пользоваться разными определениями, причем по мере уточнения представлений о системе или при переходе на другую стадию исследования определение системы не только может, но и должно уточняться.

Систему можно трактовать только как отображение, т.е. как нечто, существующее лишь в сознании исследователя, конструктора. Объективно существующие системы – и понятие системы; понятие системы, используемое как инструмент познания системы, – и снова реальная система, знания о которой обогатились нашими системными представлениями; – такова диалектика объективного и субъективного в системе.

В Большой Советской Энциклопедии дается следующее определение: *система* – это «объективное единство закономерно связанных друг с другом предметов, явлений, а также знаний о природе и обществе», т.е. подчеркивается, что понятие элемента (следовательно, и системы) можно применять как к существующим, материально реализованным предметам, так и к знаниям об этих предметах или о будущих их реализациях.

Таким образом, в понятии «система» (как и любой другой категории познания) объективное и субъективное составляют диалектическое единство, и следует говорить не о материальности или нематериальности системы, а о подходе к объектам исследования как к системам, о различном представлении их на разных стадиях познания или создания. Иными словами, в термин «система» на разных стадиях ее рассмотрения можно вкладывать разные понятия, говорить как бы о существовании системы в разных формах, т.е., выделяя страты (многоуровневые иерархические структуры) рассмотрения системы. При этом страты могут существовать не только при создании, но и при познании объекта, т.е. при отображении реально существующих объектов в виде абстрактно представляемых в нашем сознании (или в моделях) систем, что затем поможет создать новые объекты, разработать рекомендации по преобразованию (перестройке, реконструкции) существующих. Существуют различные виды и классификации систем.

Виды систем различают по назначению: система управления, информационно-поисковая система, система нормативно-методического обеспечения управления, система организационного управления, автоматизированные системы различного вида и назначения.

Системы разделяют на классы по различным признакам, и в зависимости от решаемой задачи выбираются различные принципы классификации. Можно классифицировать системы по виду отображаемого объекта (технические, биологические, экономические и т.д.); по виду научного направления (математические, физические и т.п.); по наличию взаимосвязей с внешней средой (открытые и закрытые); по возможности (сложности) предсказания поведения системы (жесткие и мягкие). Деление систем на классы приведено в табл. 1.2.

Примером классификации систем по сложности может служить классификация, предложенная Боулдингом и представленная в табл. 1.3, где каждый последующий класс, включает в себя предыдущий.

Таблица 1.2

Признак классификации	Классы систем и их характеристика
По происхождению	Естественные – это системы, существующие в естественных процессах Искусственные – системы, являющиеся продуктом человеческого ума, труда. В искусственной системе существуют три различных по своей роли подпроцесса: основной процесс, обратная связь, ограничение
По характеру поведения	Управляемые – системы, которым присущ целенаправленный характер поведения Ненауруваемые – системы, не обладающие целенаправленным поведением
По степени сложности	Простые Сложные
По длительности существования	Постоянные – системы, функционирующие в интервале, характеризующемся как бесконечность Временные системы всегда являются искусственными системами
По изменению свойств	Стабильные – системы, свойства которых не меняются во времени. Если изменения присутствуют, то они носят циклический характер Нестабильные – системы, для которых характерно изменение свойств во времени, и эти изменения не носят циклического характера
По характеру реакции на воздействия среды	Пассивные – системы не оказывающие ответного воздействия на среду Активные – системы, реагирующие на воздействия окружающей среды
По степени предсказуемости поведения системы	Стохастические (вероятностные) – это системы, для которых результаты могут быть лишь спрогнозированы в пределах какого-то диапазона возможных значений Детерминированные (функциональные), – это системы, все результаты и действия которых могут быть точно определены
По наличию входящих и выходящих потоков	Абстрактные системы представляют собой систему без входных и выходных потоков (например, система целей предприятия, математическая система уравнений и др.) Конкретная система построена на связях между элементами посредством процессов (действий) на входных и выходных потоках

Таблица 1.3

Тип системы	Уровень сложности	Примеры
Неживые системы	Статические структуры или остовы Простые динамические структуры с заданным законом поведения Кибернетические системы с управляемыми циклами обратной связи	Кристалл Часовой механизм Термостат
Живые системы	Открытые системы с самосохраняемой структурой Живые организмы с низкой способностью воспринимать информацию Живые организмы с более развитой способностью воспринимать информацию, но не обладающие самосознанием Системы, характеризующиеся самосознанием, мышлением и нетривиальным поведением Социальные системы Системы, лежащие в настоящий момент вне нашего познания (трансцендентные системы)	Клетки Растения Животные Люди Социальные организации

Классифицируют системы также и по специальным признакам: статическая и динамическая, закрытая и открытая, целенаправленная. Важную роль в выборе методов моделирования играет классификация систем по степени организованности: хорошо организованная, плохо организованная или диффузная, самоорганизующаяся или развивающаяся.

Система представляет собой целостное образование, состоящее из взаимосвязанных и взаимодействующих компонентов (элементов, подсистем) и обладающее свойствами, которые не сводятся к свойствам компонентов, рассматриваемых в отдельности, и не выводятся только из них. Эти свойства не присущи ни одному компоненту в отдельности, и они полностью или частично исчезают при исключении из системы какого-либо компонента.

Основное свойство системы – ее целостность (эмерджентность или неожиданность), единство, достигаемое через посредство определенных взаимосвязей, взаимодействий компонентов системы и проявляющееся в возникновении новых свойств, которыми компоненты системы не обладают. Целостность системы означает, что из ее свойств принципиально невозможно вывести сумму свойств составляющих ее компонентов, и, наоборот, из свойств компонентов невозможно вывести свойства целого, т.е. системы. Система обладает интегративными свойствами, т.е. свойствами, присущими системе в целом, но не свойственными ни одному из ее компонентов.

Компонент (подсистема) – любая часть системы, вступающая в определенные отношения с другими ее частями. Выделение тех или иных компонентов в системе определяется двумя соображениями: с одной стороны, объективно существующи-

ми свойствами системы, с другой стороны – целями исследований и исследовательскими возможностями. Компоненты системы могут быть двух типов – *подсистемы* и *элементы системы*, чтобы число подлежащих изучению связей между группами было минимальным. Этот процесс представляет собой выделение внутри системы отдельных сравнительно крупных ее компонентов-подсистем. Последними являются некоторые функционирующие в определенной мере самостоятельно в значительной степени изолированные группы элементов, имеющие ограниченное число связей с другими частями этой же системы или с внешней средой.

Свойство целостности (связности, единства целого) *применительно к организации* предполагает следующее:

целое первично, а части вторичны;

интеграция – это условия взаимосвязанности многих частей внутри целого;

части образуют неразрывное целое так, что воздействие на любую из них влияет на все остальные;

каждая часть имеет свое определенное назначение с точки зрения той цели на достижение которой направлена деятельность целого;

природа частей и их функций определяется положением частей в целом, а их поведение регулируется взаимоотношениями целого и его частей;

целое – это система или комплекс, или конфигурация сил, которая ведет себя как нечто единое независимо от степени его сложности;

все должно начинаться с целого – это предпосылка начала работы, а затем должны быть выделены части и определены их взаимоотношения.

Множество свойств системы не является простым объединением множеств свойств входящих в него компонентов, а включает нечто большее – такие неожиданные, качественно новые свойства, которые отсутствуют у остальных частей. При этом, объединенные в систему (целое) элементы могут терять свойства, приобретающие им вне системы, и приобретать новые.

Реальные системы существуют в пространстве и во времени и, следовательно, взаимодействуют с внешней средой и характеризуются теми или иными переменными во времени величинами.

Внешнюю среду образует окружение, с которым система взаимодействует. Например, в радиолокационных системах взаимодействие со средой заключается в передаче и приеме электромагнитной энергии, которая используется для получения информации. Для радиотехнических систем понятие среды обычно связывается с трассой распространения электромагнитных волн. Наряду с этим в понятие среды включаются и другие факторы.

Элементом системы является минимальная для данной задачи часть системы с однозначно определенными свойствами, выполнявшая в ней определенные функции (имеющая известное поведение) и не подлежащая дальнейшему членению в рамках решаемой задачи.

Подсистемы же расчленяются дальше на свои компоненты: подсистемы более низкого уровня (ранга) и элементы. Обычно в качестве подсистем фигурируют более или менее самостоятельно функционирующие части системы, выделенные по

определенным признакам и обладающие относительной самостоятельностью, определенной степенью свободы.

Выделение подсистем как самостоятельных компонентов является методическим приемом, удобным для дальнейшего исследования. В результате использования этого приема устанавливается иерархия компонентов системы, т.е. многоступенчатая многоуровневая упорядоченность компонентов. При этом каждая подсистема может рассматриваться как система более низкого уровня, а сама исследуемая система может входить составной частью (компонентом) в некоторую систему более высокого уровня (надсистему), находящуюся во внешней среде по отношению к исследуемой системе.

Понятия «элемент», «подсистема» взаимно преобразуемы: система может рассматриваться как элемент системы более высокого порядка, а элемент при углубленном анализе – как система.

Необходимость выделения в системе подсистем и элементов обусловлена не только естественным существованием в ней таких компонентов и потребностями раскрытия ее структуры, но также и тем, чтобы упростить исследование сложных систем. Действительно, чтобы иметь полное представление о системе, необходимо знать состояние каждого из ее элементов и состояние связей между ними, т.е. состояние их входов и выходов. Однако эта задача не из легких, и зачастую столь подробное изучение достаточно больших и сложных систем практически оказывается невозможным. Поэтому с целью сокращения числа рассматриваемых связей, элементы системы объединяются в группы по каким-либо признакам.

Система относительно внешней среды выступает и соответственно воспринимается как нечто единое и относительно самостоятельное, в этом и состоит ее целостность. Связь между системой и средой бывает настолько тесной, что определение границ между ними становится очень сложным. С одной стороны, граница между системой и внешней средой определяется объективно существующей относительной самостоятельностью системы и внутренней взаимосвязанностью ее частей. Однако это объективно существующее разграничение системы и среды является нечетким, размытым. С другой стороны, граница определяется характером и целью исследования, а также исследовательскими возможностями. Это разграничение является уже четким, но условным и представляет собой методический прием, обусловленный субъективным мнением исследователя.

Таким образом, отграничение системы означает выделение ее и условное разграничение тем самым всей объективно существующей реальности на систему и внешнюю среду. Так, например, в зависимости от цели исследования можно рассмотреть зенитную управляемую ракету (ЗУР), зенитный ракетный комплекс (ЗРК), группировку комплексов, систему ПВО объекта, систему ПВО района и т.д. Вопрос о том, включать ли в состав группировки личный состав, средства технического обслуживания и ремонта, сооружения и прочее обеспечение, зависит от цели исследования. Границу между вооружением (зенитными ракетными комплексами) и средствами обеспечения можно провести четко, но она будет условной.

Система, выделенная из окружающей ее внешней среды, является обособленной лишь условно, так как всегда имеет место взаимодействие системы с внешней средой.

Среда представляет собой совокупность своеобразных элементов, не входящих в состав системы, но оказывавших на нее определенное воздействие. Одни из них являются пассивными естественными объектами (природная среда), ограничивающими действие системы, другие – активными антагонистическими элементами, целенаправленно противодействующими системе (помехи, создаваемые противником с целью нарушения нормального функционирования радиотехнических систем). Поэтому в общем случае среду следует рассматривать не только безразличной, но и антагонистической по отношению к исследуемой системе.

В начале исследования важно уметь отделять систему от среды, с которой взаимодействует система. Частным случаем выделения системы из среды, с которой взаимодействует система, является представление ее через «входы» и «выходы» (кибернетическое представление в виде «черного ящика»). При отделении системы от среды следует учитывать три положения наблюдателя (исследователя): 1) исследователь относит себя к среде, представляя систему как полностью изолированную (замкнутую); 2) исследователь включает себя в систему, рассматривая ее с учетом своего влияния и влияния системы на свои представления о ней; 3) исследователь выделяет себя из системы и из среды, рассматривая систему как открытую, постоянно взаимодействующую со средой (рассматривая систему более высокого уровня сложности, на высшем уровне исследования). Таким образом, в процессе исследования, уточняя модель системы, граница между средой и системой может деформироваться.

С понятием среды тесно связано понятие *живучести реальной системы*. Свойство системы активно (при помощи соответствующим образом организованной структуры и поведения) противостоять вредным воздействиям внешней среды и выполнять свои функции в заданных условиях такого воздействия называется живучестью системы. Благодаря этому свойству отказ какого-либо компонента или группы компонентов системы не приводит к отказу всей системы, а только к некоторому снижению эффективности ее функционирования.

Высокая живучесть характерна для систем, имевших иерархическую структуру и обладающих свойствами адаптации и самоорганизации. Для повышения живучести технических систем вводят функциональную и структурную избыточность, дублируя компоненты или используя высоконадежные защитные элементы. Например, характерной особенностью любой радиотехнической системы является необходимость борьбы с вредным воздействием помех для достижения заданных уровней показателей качества.

В основе борьбы с помехами лежат организационные и технические меры по максимально возможному предотвращению помеховых воздействий и подавлению их источников (например, применение охлаждаемых малошумящих усилителей на входе приемных устройств, снижающих уровень внутренних шумов, регламентирование частотного спектра и т.д.), а также комплекс методов, основанных на различиях в характеристиках полезных сигналов и помеховых воздействий и внесении статистической и структурной избыточности.

Практическая реализация различных методов борьбы с помехами привела к существенному усложнению структур радиотехнических систем, особенно подсистем

тем формирования, приема и обработки сигналов, усложнению формы самих радиосигналов, применению пространственной, поляризационной, частотной, временной и кодовой селекции, автокомпенсации помех, расширения динамического диапазона приемного тракта, а также к увеличению энергетических затрат на передачу электромагнитных колебаний для обеспечения определенного превышения энергии полезного сигнала над энергией помех. Защита радиотехнических систем от преднамеренных и непреднамеренных помех достигается комплексным применением технических мер обеспечения помехозащищенности и осуществлением организационных мероприятий, повышающих помехоустойчивость группировок радиоэлектронных средств и систем управления.

Итак, любая система существует в среде и может рассматриваться как подсистема некоторой более общей системы. Приступая к исследованию системы, прежде всего, необходимо выделить систему из окружающих ее систем, другими словами, определить систему, установив ее состав и границы. Если исследуемая или проектируемая система неправильно выделена из внешней среды, то может оказаться, что при исследовании будут сделаны неправильные выводы, а при проектировании будут приняты нерациональные и даже ошибочные решения.

1.3.2. Структура системы

Основную роль в формировании новых свойств системы, отличных от свойств ее компонентов, играет структура системы.

Структура системы – это ее относительно устойчивая организация из отдельных компонентов с их взаимосвязями, которые обусловлены распределением функций и целей, выполняемых и достигаемых системой в целом и ее отдельными компонентами. Структуру системы определяет совокупность ее элементов и устойчивых связей между ними. В самом общем виде можно выделить два основных типа структурных связей: «подчинения–подчиненности» и «согласования».

Связь подчинения-подчиненности предполагает, что один из двух взаимосвязанных компонентов является определяющим в их совместном функционировании. Связь согласования – это такая связь, при которой роли обоих взаимосвязанных компонентов в их совместном функционировании равноценны.

Компоненты системы, размещенные по иерархическим уровням с их связями определяют иерархическую структуру системы. Два компонента, связанные подчинением-подчиненностью, размещаются на соседних уровнях иерархии. Компоненты на одном уровне иерархии могут иметь связь согласования.

Между компонентами системы и компонентами внешней среды также имеются связи – коммуникативные связи. Аналогично структурным связям они могут быть двух типов: подчинения-подчиненности и согласования. Так, например, ЗРК – компонент системы ПВО – взаимодействует по меньшей мере с такими компонентами внешней среды, как природная среда и самолет противника.

Каждый компонент в составе системы выполняет определенные функции. Они определяются, с одной стороны, собственными свойствами компонента, а с другой – его структурными и коммуникативными связями. Между функциями компонентов также имеются связи подчинения и согласования, в результате чего

можно представить иерархическую структуру функций компонентов. На верхнем уровне этой иерархической структуры находятся общесистемные функции, на выполнение которых направлены все функции компонентов системы.

Иерархической структуре компонентов системы соответствует иерархическая структура их функций: выполнение функций более высокого уровня обеспечивается совокупностью функций предшествующего уровня, которые, в свою очередь, обеспечиваются функциями более низкого уровня и т.д. вплоть до элементарных функций, реализуемых отдельными элементами системы. Ключевую роль в описании изменений во времени, происходящих в системах, играет понятие состояния.

Состоянием системы называют совокупность существенных свойств, которыми система обладает в каждый рассматриваемый момент времени. Система, состояние которой изменяется во времени под воздействием определенных причинно-следственных связей, называется динамической системой. Для статической системы такое изменение не наблюдается.

Процесс целенаправленного во времени изменения состояния системы называется ее функционированием. Функционирование системы – это проявление ее функций во времени. Положения формализации общей *схемы процесса функционирования системы*:

система функционирует во времени, взаимодействуя с внешней средой, и в каждый момент времени может находиться в одном из возможных состояний; на вход системы могут поступать входные воздействия;

система способна выдавать выходные сигналы;

состояние системы в данный момент времени определяется предыдущими состояниями и входными воздействиями, поступающими в данный момент времени и ранее;

выходной сигнал в данный момент времени определяется состоянием системы и входными воздействиями, относящимися к данному и предшествующим моментам времени;

функционирование системы как единого целого обеспечивается связями между ее компонентами.

1.3.3. Методы формализованного представления систем

В связи с непрерывным развитием математики возникают новые области и математические теории. Одновременно изменяются и развиваются различные точки зрения по включению отдельных научных математических направлений в число математических (например, математическую лингвистику и семиотику часто не относят к математике). Поэтому вместо термина «математические методы» применяется термин «*методы формализованного представления систем*».

Методы формализованного представления систем (МФПС) – класс методов, выделенный в классификации моделирования систем.

Классификации методов формализованного представления систем. Во время первоначально применявшихся при исследовании систем классификаций выделяли детерминированные и вероятностные (статистические) методы или классы моделей.

Таблица 1.4

Название класса методов	Основная терминология и примеры теорий, возникающих и развивающихся на базе соответствующего класса методов	Сферы и возможности применения
1	2	3
Аналитические методы (методы классической математики, включая интегрирование, дифференциальное исчисление, методы поиска экстремумов функций, вариационное исчисление) и т. п.; Математического программирования; теория игр	Аналитическими здесь названы методы, которые ряд свойств многомерной, многоосевой системы отображают в n-мерном пространстве в виде одной единственной точки (безгазмерной в строгих математических доказательствах), совершающей какие-либо перемещения в пространстве (или обладающую каким-то поведением). Это отображение осуществляется посредством оператора (функции, функционала) $\Phi[S_1]$. Можно также две (или более) системы или их части отобразить точками и рассматривать взаимодействие этих точек. Поведение точек, их взаимодействие описываются строгими соотношениями, имеющими силу закона. Основу понятийного (терминологического) аппарата этих представлений составляют понятия классической математики (величина, формула, функция, уравнение, система уравнений, логарифм, дифференциал, интеграл и т.д.). На базе аналитических представлений возникают и развиваются математические теории различной сложности – от аппарата классического математического анализа (методов исследования функций, их вида, способов представления, поиска экстремумов функций и т.п.) до таких новых разделов современной математики, как математическое программирование (линейное, нелинейное, динамическое и т.п.), теория игр (матричные игры с чистыми стратегиями, дифференциальные игры и т.п.).	Применяются в тех случаях, когда свойства системы можно описать с помощью детерминированных величин или зависимостей, т.е. когда знания о прошлых и событиях в некотором интервале времени позволяют полностью определить поведение их вне этого интервала. Эти методы используются при решении задач движения и устойчивости, оптимального размещения, распределения работ и ресурсов, выбора наилучшего пути, оптимальной стратегии поведения, в том числе в конфликтных ситуациях и т. п. Математические теории, развивающиеся на базе аналитических представлений, направлений стали основой многих ирриклдных теорий, в том числе теории автоматического управления, теории оптимальных решений и т. д. При иррактическом применении аналитических представлений для отображения сложных систем следует иметь в виду, что они требуют установления всех детерминированных связей между учитываемыми компонентами и целями системы в виде аналитических зависимостей. Для сложных многокомпонентных, многосистермальных систем получить требуемые аналитические зависимости крайне трудно. Более того, даже если это и удается, то практически невозможно доказать правомерность применения таких выражений, т.е. адекватность модели рассматриваемой задаче.

Продолжение табл. 1.4

1	2	3
Статистические методы (теоретические разделы математики - теории вероятностей, математическая статистика и направления прикладной математики, использующие стохастические представления - теорию массового обслуживания, методы статистических испытаний (основание на методе Монте-Карло), методы выдвижения и проверки статистических гипотез и другие методы статистического имитационного моделирования).	Статистическим называют отображение системы с помощью случайных (стохастических) событий, процессов, которые описываются вероятностными характеристиками и статистическими закономерностями. Статистические отображения системы можно представить (см. символический образ) как бы в виде «размытой» точки (размытой области) в n-мерном пространстве, в которую переводит систему (ее учитываемые в модели свойства) оператор $\Phi[X_n]$. «Размытую» точку следует понимать как некоторую область, характеризующую движение системы (ее поведение); при этом границы области заданы с некоторой вероятностью p (под вероятностью события понимается $p(A) = m/n$, где m - число появлений события A, n - общее число опытов; если при $n \rightarrow \infty$ $m/n \rightarrow \text{const}$), т.е. как бы размыты, и движение точки описывается некоторой случайной функцией. Закрепляя все параметры этой области, кроме одного, можно получить срез по линии $a - b$, смысл которого - воздействие данного параметра на поведение системы, что можно описать статистическим распределением по этому параметру. Аналогично можно получить двумерную, трехмерную и т.д. картины статистического распределения. На базе статистических представлений развивается ряд математических теорий: математическая статистика; теория статистических испытаний (основой которой является метод Монте-Карло), а развитием - теория статистического имитационного моделирования; теория выдвижения и проверки статистических гипотез, базирующаяся на общей теории статистических решающих функций А. Вальда (частным случаем этой теории, важным для теории систем, является байесовский подход к исследованию передачи информации в процессах общения, обучения и др. ситуациях); теория потенциальной помехоустойчивости и теории решающих функций; теория статистических решений (обобщившая теорию выдвижения и теорию потенциальной помехоустойчивости).	На базе статистических представлений возникли и развиваются прикладные направления: статистическая радиотехника, статистическая теория распознавания образов, экономическая статистика, теория массового обслуживания, а также развившиеся из направлений, возникших на базе аналитических представлений, стохастическое программирование, новые разделы теории игр и т.п. Распространение возможностей отображения сложных систем и процессов по сравнению с аналитическими методами можно объяснить тем, что при применении статистических представлений процесс постановки задачи как бы частично заменяется статистическими исследованиями, позволяющими, не выявляя все детерминированные связи между изучаемыми объектами (событиями) или учитываемыми компонентами сложной системы, на основе выборочного исследования (исследования репрезентативной выборки) получать статистические закономерности и распространять их на поведение системы в целом с какой-то вероятностью. Однако не всегда можно получить статистические закономерности, не всегда может быть определена репрезентативная выборка, доказана правомерность применения статистических закономерностей. Если же не удается доказать репрезентативность выборки или для этого требуется недопустимо большое время, то применение статистических методов может привести к неверным результатам. В таких случаях целесообразно обратиться к методам, объединяемым под общим названием <i>методы дискретной математики</i>, которые помогают разрабатывать языки моделирования, модели и методики постепенной формализации процесса принятия решения. Статистические и теоретико-множественные методы инициировали возникновение теории нечетких или размытых множеств Л. Заде, которая явилась началом развития нового направления - нечетких формализаций

1. ВООРУЖЕНИЕ И ВОЕННАЯ ТЕХНИКА КАК ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Продолжение табл. 1.4

1	2	3
Теоретико-множественные представления (теоретико-множественные, логические, лингвистические, мнотипические представления (методы дискретной математики), составляющие теоретическую основу разработки языков моделирования, автоматизации проектирования, информационно-поисковых языков)	Теоретико-множественные представления базируются на понятиях множества, элементы множества, отношения на множествах, континуум. Множества могут задаваться следующими способами: 1) перечислением (интенсионально): $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, где $i = 1, \dots, n$ или $< a_1, a_2, \dots, a_n >$, где $a_i \in A$; 2) путем указания некоторого характеристического свойства A (экстенсинально). В основе теоретико-множественных преобразований лежит переход от одного способа задания множества к другому: в множестве могут быть выделены подмножества. Из двух или нескольких множеств можно формировать путем установления отношений между элементами этих множеств новое множество, обладающее принципиально новыми свойствами и, как правило, новое качество приобретают и элементы. Теоретико-множественные представления допускают введение любых произвольных отношений. При конкретизации отношений и правил их использования можно получить одну из алгебр логики, один из формальных языков математической лингвистики, создать язык моделирования сложной системы, который затем, получив соответствующее название может развиваться как самостоятельное научное направление. Между теоретико-множественными описаниями разных систем или их частей можно устанавливать соответствия: гомоморфизма, изоморфизма, автоморфизма, отношения рефлексивности, симметричности, транзитивности, заимствованные теорией множеств из других разделов математики.	Благодаря возможности введения любых отношений теоретико-множественные представления используются как обобщающий язык при сопоставлении различных направлений математики и других дисциплин. Они явились основой для возникновения новых научных направлений или развития существующих. В частности, теоретико-множественные представления получили широкое распространение для уточнения ряда математических направлений (первой теорией, для которой на основе этих представлений были получены важные новые результаты, была теория чисел); сыграли большую роль в становлении комбинаторики, топологии, в разработке теории «размытых» множеств Л.Заде; на их основе стали создаваться первые информационно-поисковые языки, языки автоматизации моделирования; на теоретико-множественных представлениях базируется вариант математической теории систем М. Месаровича. Система может быть представлена совокупностью множеств или подмножеств разнородных компонентов с произвольно вводимыми элементами и отношениями. Однако свобода введения произвольных отношений приводит к тому, что в формализованном с их помощью описании проблемной ситуации довольно быстро могут обнаружиться неразрешимые противоречия – парадоксы, апории или антиномии, что не позволяет оперировать с получаемыми теоретико-множественными моделями таким же образом, как с классическими математическими (аналитическими, статистическими) соотношениями, гарантируя достоверность получаемых результатов.

Продолжение табл. 1.4

1	2	3
Логические методы или математическая логика	Логические представления переводят реальную систему и отношения в ней на язык одной из алгебр логики (двузначной, многозначной), основанной на применении логических методов для выражений законов алгебры логики. Наибольшее распространение получила бинарная алгебра логики Буля (булева алгебра). Базовыми понятиями алгебры логики являются: высказывание, предикат, логические функции (операции) кванторы, логический базис, логические законы или теоремы (законы алгебры логики), применяя которые можно преобразовать систему из одного описания в другое с целью ее совершенствования. Например, получить более простую структуру (схему), содержащую меньшее число состояний, элементов, но осуществляющую требуемые функции. Теоремы доказываются и используются в рамках формального логического базиса, определяемого совокупностью специальных правил. Логические методы представления систем относятся к детерминистским, хотя возможно их расширение в сторону вероятностных оценок. На базе математической логики созданы и развиваются теории логического анализа и логического синтеза, теории автоматов. На основе логических представлений первоначально начинали развиваться некоторые разделы теории формальных языков. В силу ограниченности смысловыражающих возможностей бинарной алгебры логики в последнее время имеются попытки создания многозначных (тернарной и т.п.) алгебр логики с соответствующими логическими базисами и теоремами	Применяются при исследовании новых структур и систем разнообразной природы (технических объектов, текстов и др.), в которых характер взаимоотношений между элементами еще не настолько ясен, чтобы было возможно их представление аналитическими методами, а статистические исследования либо затруднены, либо не привели к выявлению устойчивых статистических закономерностей. В то же время следует иметь в виду, что с помощью логических алгоритмов можно описывать не любые отношения, а только те, которые предусмотрены законами алгебры логики и удовлетворяют требованиям логического базиса. Логические представления широко применяются при исследовании и разработке автоматов разного рода, автоматических систем контроля, при решении задач распознавания образов. На их основе развивается самостоятельный раздел теории формальных языков - языки моделирования проблемных ситуаций и текстов. В то же время смысловыражающие возможности логических методов ограничены базисом и не всегда позволяют адекватно отобразить реальную проблемную ситуацию. Поэтому стали предприниматься попытки создания вначале тернарной логики, а затем и многозначных логик, вплоть до непрерывной. Однако попытки создания многозначных логик на практике пока не находят широкого применения из-за сложности обоснования логического базиса и доказательства формальных теорем-законов многозначной алгебры логики, без чего невозможно формально применять логические законы и алгоритмы и получать достоверные результаты

Окончание табл. 1.4

1	2	3
Лингвистические и семиотические представления (математическая лингвистика и семиотика)	Основными понятиями, на которых базируются лингвистические представления, являются понятия: тезаурус Т, грамматика G, семантика, прагматика. Термин тезаурус (от греч. <i>thesauros</i> – сокровищница, богатство, клад, запас и т.п.) в общем случае характеризует «совокупность научных знаний о явлениях и законах внешнего мира и духовной деятельности людей, накопленную всем человеческим обществом». В математической лингвистике и семиотике термин тезаурус используется в более узком смысле для характеристики конкретного языка, его многоуровневой структуры. Для этих целей удобно пользоваться одним из принятых в лингвистике определений тезауруса как «множества смысловыражающих элементов языка с заданными смысловыми отношениями», которое дал Ю.А. Шрейдер. Для системных приложений интересно сочетание математической лингвистики и семиотики, которая возникла как наука о знаках, знаковых системах. Однако некоторые школы, развивающие семиотические представления, равноправно пользуются в семиотике понятиями математической лингвистики, такими как тезаурус, грамматика, семантика и т.п. Такие представления иногда называют лингвистической семиотикой или лингвосо семиотикой. С теоретической точки зрения границу между лингвистическими семиотическими представлениями при разработке языков моделирования можно определить характером правил грамматики: если правила не охватываются классификацией формальных грамматик Н. Хомского, то модель относится к семиотической и применяются произвольные правила взаимоотношений между знаками, отображающими компоненты модели, допустимые семиотикой.	Для практических приложений модели лингвистических и семиотических представлений можно рассматривать как один класс методов формализованного представления систем. Лингвистические и семиотические представления возникли и развиваются в связи с потребностями анализа текстов и языков. Однако во второй половине XX в. эти представления стали широко применяться для отображения и анализа процессов в сложных системах в тех случаях, когда не удается применить сразу аналитической, статистические представления или методы формальной логики. В частности, лингвистические и семиотические представления являются удобным аппаратом (особенно в сочетании с графическими) для первого этапа постановки и формализации задач принятия решений в ситуациях с большой начальной неопределенностью, чем и был вызван интерес к этим методам со стороны инженеров и специалистов, занимающихся исследованием и разработкой сложных систем. На их основе разрабатывают языки моделирования и автоматизации проектирования. При применении этих методов следует иметь в виду, что при усложнении языка моделирования, при применении правил произвольной грамматики или семиотики трудно гарантировать достоверность получаемых результатов, возникают проблемы алгоритмической разрешимости, парадоксов, которые частично могут быть преодолены с помощью содержательного контроля и коррективки языка на каждом шаге его расширения в диалоговом режиме моделирования. При этом разработчик языка моделирования не всегда может формально объяснить его возможности, происходит как бы «выращивание» языка, у которого появляются новые свойства, повышающие его смысловыражающие возможности

Окончание табл. 1.4

1	2	3
Графические представления (теория графов и разного рода графические представления информации типа диаграмм, гистограмм и других графиков)	К графическим представлениям здесь отнесены любые графики (диаграммы, гистограммы, графики Ганта, т. е. «время-операция» в прямоугольных координатах и т.д.) и возникшие на основе графических отображений теории: теория графов, теория сетевого планирования и управления и т.п., т.е. все, что позволяет наглядно представить процессы, происходящие в системах, и облегчить таким образом их анализ для человека (лица, принимающего решения). Графики Ганта выполнялись с ручным, а в последующем и с автоматическим управлением. В последующем на этой основе возникли представления совокупности дискретных операций в дискретном времени как множества событий, упорядоченных в двух измерениях – сетевые структуры. Есть и возникшие на основе графических представлений методы, которые позволяют ставить и решать вопросы оптимизации процессов организации, управления, проектирования и являются математическими методами в традиционном смысле. Таковы геометрия, теория графов. Понятие графа в математическом смысле первоначально было введено Л.Эйлером	Графические представления являются удобным средством исследования структур и процессов в сложных системах, средством организации взаимодействия человека и технических устройств (в том числе ЭВМ). На основе сетевых структур возникли прикладные теории: PERT (Program Evaluation and Review Technique – Методика оценки и контроля программ), теория сетевого планирования и управления (СПУ). Первоначально СПУ широко применялись не только в управлении производственными процессами (где достаточно несложно построить сетевой график), но и в системах организационного управления. Однако применение СПУ ограничивается ее недостатками: 1) теория первоначально была ориентирована на анализ только одного класса графов – направленных, не имеющих обратных связей, т.е. циклов, петель; 2) доля «ручного» труда ЛПР при разработке сетевого графика составляет по оценкам специалистов до 95% общих затрат времени на анализ ситуаций и процессов с использованием СПУ. Поэтому разрабатываются методы статистического сетевого моделирования с использованием вероятностных оценок и направленных графов, подходы к автоматизации формирования графов

В дальнейшем появились классификации, в которых в самостоятельные классы выделились теоретико-множественные представления, графы, математическая логика и некоторые новые разделы математики. Имеются и другие классификации. Практически невозможно создать единую классификацию, которая включала бы все разделы современной математики. В то же время приведенные направления помогают понять особенности конкретных методов, использующие средства того или иного направления или их сочетания, помогают выбирать методы для конкретных приложений. Классификация, в которой выделяются обобщенные (укрупненные) группы (классы) методов, представлена в табл. 1.4. При этом, в связи с развитием математики, возникают новые направления как бы «на пересечении» методов, отнесенных к приведенным укрупненным группам.

Для удобства выбора методов решения реальных практических задач на базе математических направлений развиваются прикладные классификации МФПС.

С широким развитием автоматизированных систем сбора, хранения и поиска информации разного рода, появилась потребность в разработке классификаций методов работы с информационными массивами. Одна из таких классификаций приведена в табл. 1.5.

Таблица 1.5.

Прикладные классификации методов работы с массивами информации	Классификации методов формализованного представления систем					
	Аналитические	Статистические	Теоретико-множественные	Логические	Лингвистические	Графические
Методы организации массивов			+	+		+
Методы обработки массивов (сортировки, упорядочения, размещения)			+	+		
Методы поиска информации			+	+	+	

При выборе метода моделирования для постановки принципиально новых задач с большой начальной неопределенностью удобно связать классификацию методов формализованного представления с классификацией систем. Классификацию методов формализованного представления систем можно связать с классификацией систем по степени организованности: если предварительный анализ проблемной ситуации показывает, что она может быть представлена в виде хорошо организованных систем, то можно выбирать методы моделирования из классов аналитических и графических методов; при описании плохо организованных или диффузных систем

обычно обращаются к статистическому моделированию, а если не удастся доказать адекватность ее применения, то используют закономерности специальных методов. При этом следует учитывать, что любая классификация методов не является исчерпывающей. Однако, хорошо структурированная классификация позволит в более сжатые сроки выбрать методы описания и исследования систем, и их моделей для выполнения того или иного этапа методики системного анализа.

1.3.4. Управление в системах

Согласованное взаимодействие всех компонентов системы друг с другом в процессе ее функционирования обеспечивается путем управления системой.

Управление, рассматриваемое как кибернетический процесс – это обобщение приемов и методов, накопленных разными науками об управлении искусственными объектами и живыми организмами. *Язык управления* – это использование понятий «объект», «среда», «обратная связь», «алгоритм» и т.д.

Под управлением понимается процесс организации такого целенаправленного воздействия на некоторую часть среды, называемую *объектом управления*, в результате которого удовлетворяются потребности субъекта, взаимодействующего с этим объектом. Анализ управления позволяет выделить триаду – среду, объект и субъект, внутри которой реализуется процесс управления. В данном случае субъект ощущает на себе воздействие среды и объекта. Если состояние среды он изменить не может, то состоянием объекта он может управлять с помощью специально организованного воздействия. Это и есть управление.

В широком смысле управление – это функция системы, ориентированная либо на сохранение основного качества, т. е. совокупности свойств, утрата которых ведет к разрушению системы в условиях изменения среды, либо на выполнение некоторой программы, обеспечивающей устойчивость функционирования, гомеостаз, достижение определенной цели.

Гомеостаз (гомеостазис) (греч. *homeo* – подобный, *stasis* – неподвижность) – понятие, введенное биологом Кэнноном для обозначения физиологических процессов, поддерживающих некоторые переменные состояния организма, относящиеся к существенным (давление, температура и т.п.), на определенном уровне или в определенных границах.

Применительно к теории систем гомеостазом первоначально называли свойство системы сохранять в процессе взаимодействия со средой значения существенных переменных в некоторых заданных пределах. Существенными называют характеристики, влияющие на основное качество системы, нарушение которого приводит к ее разрушению. При этом существенные переменные должны оставаться стабильными при различных состояниях среды и обеспечивать равновесие системы.

В таком понимании гомеостаз или равновесие характеризует систему как целое, а не как отдельные ее части.

Определение гомеостаза через жесткую неизменность существенных переменных, интерпретируемых как параметры состояния системы, в ряде случаев оказывается недостаточным для описания функционирования сложных систем. Так,

при описании социально-экономических систем сложно выявить такие переменные, или выявленные характеристики могут не иметь ясной содержательной интерпретации. Такие объекты, как правило, следует отображать классом самоорганизующихся систем, структура и характеристики которых могут меняться с течением времени, а условие жесткой фиксации границ существенно.

Разделение системы на управляющую и управляемую не всегда можно осуществить однозначно. В сложных развивающихся системах эти блоки могут быть совмещены. Такой режим называют *саморегулированием*.

Если управление осуществляется сознательно, то управляющая система создается субъектом управления, который формирует цель (цели) управления. Иногда субъект управления отождествляется с управляющей системой, а в качестве цели принимается выполнение программы управления. Это особенно характерно для социально-экономических систем, но возможно и в технических системах (например, в системах телеуправления размещение на объекте управления устройства приема и передачи информации можно относить как к объекту, так и к управляющей системе).

Управление рассматривается также, как процесс целенаправленного воздействия на объект управления со стороны управляющего объекта для изменения его состояния в соответствии с изменяющейся обстановкой. Управление выступает важнейшим системообразующим фактором, посредством которого достигается цель и предопределяется характер функционирования системы.

В динамических системах под управлением понимается использование причинно-следственных отношений для того, чтобы процесс изменения состояния системы и процесс на ее выходе принимали желаемые значения на заданном отрезке времени. Влиять на процессы в управляемой системе можно, изменяя ее входные воздействия.

Среди процессов на входе системы выделяют процессы управления и неконтролируемые процессы воздействия среды. Последние воздействия возмущения часто препятствуют достижению цели функционирования системы.

Для управления системой необходима информация о состоянии внешней среды и компонентов системы, о выполнении компонентами своих функций. Управлявшее воздействие (управление) формируется в результате соответствующей переработки информации, путем сравнения информации о состоянии внешней среды и компонентов системы с требуемым или желаемым состоянием системы во внешней среде. На рассогласовании вырабатывается управление по приведении системы в требуемое состояние.

Как следует из определения управления, в структуре системы, за которой имеет место процесс управления, необходимо различать управляемую и управляющую подсистемы, а управляющая подсистема в случаях, когда в явном виде осуществляется определение состояния по данным измерений, может быть расчленена в свою очередь на подсистему наблюдения, решающую последнюю задачу, и собственно подсистему управления, формирующую управлявшее воздействие. Если от управляемой подсистемы систематически поступает информация к управлявшей подсистеме о результатах управления, то говорят, что в системе существует обратная связь, через которую замыкают контур управления.

В зависимости от характера, направленности и содержания управляющих потоков информации в системах выделяют различные виды управления: программное управление, управление с обратной связью, управление по возмущению, управление путем адаптации и т.д.

Система управления — это совокупность взаимозависимых элементов, образующих единое целое, выполняющее определенную функцию. В составе системы управления выделяют управляющую подсистему, программу управления, ресурсы управления. Структура управляющей подсистемы может быть представлена как совокупность взаимосвязанных блоков, от «настройки» которых непосредственно зависит вклад каждого элемента (подсистемы) в достижение цели системы.

Для выполнения функций управления и реализации успешного управления сложной системой в управляющем контуре необходимы следующие *подсистемы*:

подсистема целеуказания, позволяющая определять цели управления;

информационная подсистема, в любой момент обеспечивающая управление актуальной, полной и точной информацией о состоянии управляемого объекта и внешней среды, а также о тенденциях их изменения в будущем;

аналитическая подсистема, обеспечивающая инструментарием и методами, с помощью которых на основании поступающей информации в допустимые сроки принимается обоснованное заключение о необходимых управляющих воздействиях на объект управления (рассчитать управляющее воздействие);

эффективная исполнительная подсистема, позволяющая быстро и точно реализовать управляющее воздействие;

подсистема обратной связи для оценки результата управляющего воздействия на состояние объекта управления и внесения корректив в случае выхода (отклонения) достигнутого состояния системы от ее желаемого состояния за пределы заданного интервала – интервала допустимых отклонений.

1.3.5. Функции систем управления

Сущность систем управления проявляется в их функциях. *Функция* — это отвлеченная, т.е. не связанная с конкретным методом исполнения, характеристика действия системы. Она представляет собой правило получения результатов, предписанных целью (назначением) системы. Функция устанавливает, что делает система для достижения поставленной цели безотносительно к физическим средствам (элементам, связям), составляющим саму систему, и не определяет, как устроена система.

Основной задачей системы управления является процесс формирования управляющих воздействий. *Процесс управления* – совокупность действий, ведущая к образованию и совершенствованию связей между частями системы. Как явление — это объединение элементов (целей, программ, ресурсов) для реализации цели системы.

Оценивая систему управления, можно работать с неограниченным числом критериев, относящихся к различным функциям системы. На практике принято выделять основные функции системы управления, представленные в табл. 1.6.

Таблица 1.6.

Функции систем управления и их воздействия	Назначение (реализация) функций систем управления
Интегрирующая функция	Реализация компонентами системы целей системы
Информационная функция	Накопление, селекция, обработка и передача информации в пространстве и во времени. Выполняя информационную функцию, управление в системе обеспечивает непрерывность ее функционирования в используемом наборе показателей, определяет адекватность последнего целям применения
Получение от подсистем недостающей информации	При недоопределенности характеристик полученных данных по информационным признакам
Разрешение конфликтных ситуаций при объединении информации от разных подсистем	При неразрешимости ситуации в рамках обработки информации когда возникает конфликтная ситуация (противоречивость информационных признаков от разных подсистем). Устранение неоднозначности в определении информации осуществляется путем уточнения (перепроверки) информации от подсистем
Принятие мер по управлению подсистемами при разрывах или отсутствии поступления информации от них	Путем своевременной выдачи управляющих воздействий в адрес подсистем (элементов) и своевременная «передача» необходимой информации от одной подсистемы к другой
Исключение избыточной информации из-за технических ограничений подсистем	Учет при реализации управления пропускной способности каналов связи и систем обработки информации
Регулирующая и координирующая функции	Направление деятельности подсистем в русло, наиболее полезное эффективности системы в целом, и приостановка деятельности элементов и подсистем, приносящих отрицательные последствия
Координация выдачи всех управляющих воздействий на подсистемы (элементы)	Исключение одновременно противоречивых управляющих воздействий, вырабатываемых одновременно на одну и ту же подсистему (элемент) когда алгоритмы определяют требования (поток заявок), а координатор в управлении определяет систему их обслуживания (система приоритетов)
Организация рационального распределения ресурсов и информации между подсистемами	Перераспределение ресурсов системы при реализации функций системы (обработке информации, расчетах, управлении и. т.д.). Сосредоточение максимально возможного ресурса системы (информационного потенциала) на наиболее сложных и ответственных направлениях деятельности системы
Регулирующая и координирующая функции (прогностично-диагностическая)	Направленность на вскрытие причин проблем и устранение возможности их повторения в целях повышения эффективности управления Прогнозирование состояния системы внешних воздействий и состояния системы в условиях частичной информации. Организация адаптации в системе с целью получения новых ценных данных
Защитная функция	Защита подсистем и системы в целом от противодействия мешающих факторов. Блокировка ненужной для системы информации. Снижение уровня воздействия мешающих факторов (фильтрация, изменение поведения системы)

1.3.6. Требования, предъявляемые к системам управления

Для эффективного достижения целей системы управления необходимо, чтобы во всем диапазоне возможных воздействий внешней среды на систему, характеризующихся своей скоростью развития и интенсивностью, все ее подсистемы выполняли свои функции регламентированным образом, при этом коллективно вносимые ими помехи минимально искажали реакцию системы. Таким образом, для создания сложной системы необходимо решить *задачу синтеза системы управления* (разработки, совершенствования или реорганизации структуры системы), которая должна обладать желаемыми свойствами.

Типовыми требованиями, предъявляемыми к системе управления, являются:

- информационная обеспеченность процесса управления;
- допустимые продолжительность цикла управления и уровень помех в нем;
- защищенность контура управления от внешних помех;
- ограниченная допустимой величиной вероятность нарушения цикла управления во всем диапазоне условий функционирования системы, что означает фиксацию допустимой вероятности отказов при выполнении целевых функций системы;
- способность системы к выполнению своих функций во всем диапазоне внешних условий, т.е. общая живучесть системы;
- структура системы управления должна обеспечивать запас статической устойчивости к малым возмущениям внешней и внутренней сред, демпфируя их в местах воздействия на систему и препятствуя развитию эффектов отрицательной синергии при распространении их воздействия на другие подсистемы;
- допустимая стоимость системы, включая расходы на ее создание и функционирование;
- специальные требования в зависимости от назначения системы.

Иногда в эти требования включают число управляемых объектов, которые должна вести подсистема управления, однако для системы это требование не является определяющим, поскольку укрупнением либо разукрупнением управляемых объектов можно изменять их число в нужном направлении. Наоборот, определение числа и состава входящих в систему подсистем (компонентов), а также способов организации связей между ними и составляет типичную задачу реорганизации системы при ее переходе на следующий этап развития.

1.4. Представление изделий ВТ как объектов исследований

1.4.1. Свойства и качество изделий

Свойство – сторона системы (элементов), обуславливающая различие и сходство с другими системами (элементами) и проявляющаяся при взаимодействии с ними. Свойства систем (с условным делением их по группам) и их характеристики представлены в табл. 1.7.

Для конкретного исследования существенны лишь те свойства, которые определяются целью исследования. Некоторые системы могут не иметь перечисленных в табл. 1.7 свойств, но при этом у них могут появляться специфические свойства.

Таблица 1.7

Свойства системы	Описание свойств системы (характеристика)
1	2
	Группа — свойства, характеризующие сущность и сложность системы
Первичность целого	Системы существуют как целое, которое затем можно членить на компоненты, существующие лишь в силу существования целого. Не компоненты составляют целое, а наоборот, целое порождает при своем членении компоненты системы. В системе отдельные части функционируют совместно, составляя в совокупности процесс функционирования системы как целого
Размерность системы	Число компонентов системы и связей между ними. В зависимости от числа системы подразделяются на малые, средние и большие
Сложность структуры системы	Число уровней иерархии управления системой, многообразие компонентов и связей, сложность поведения, сложность описания и управления системой, число параметров модели управления, ее вид, объем информации, необходимой для управления и т.д.
Жесткость системы	Степень изменения параметров системы за определенный промежуток времени, степень влияния на функционирование системы объективных законов и закономерностей, степень свободы системы и др.
Вертикальная целостность системы	Число уровней иерархии, изменения в которой влияют на всю систему, степень взаимосвязи уровней иерархии, степень влияния субъекта управления на объект, степень самостоятельности подсистем и компонентов системы управления
Горизонтальная обособленность системы	Число связей между компонентами одного уровня, их зависимость и интегрированность по горизонтали
Иерархичность системы	Каждый компонент (подсистема) может рассматриваться как подсистема некоторой более глобальной системы. Свойство иерархичности проявляется при структуризации (построение дерева) и декомпозиции целей организации, показателей товаров и т.д.
Многофункциональность	Способность системы к реализации множества функций на заданной структуре

Продолжение табл. 1.7

1	2
	II группа — свойства, характеризующие связь системы с внешней средой
Степень самостоятельности системы	Число связей системы с внешней средой в среднем на один ее компонент или иной параметр. Скорость отмирания, деления или объединения компонентов системы без вмешательства внешней среды
Открытость системы	Интенсивность обмена информацией или ресурсами с внешней средой, число систем внешней среды, взаимодействующих с данной системой, степень влияния других систем на данную систему
Совместимость системы	Степень совместимости системы с другими системами внешней среды по правовому, информационному, научно-методическому и ресурсному обеспечению. Инструментом обеспечения совместимости является стандартизация всех объектов на всех уровнях иерархии управления
Стойкость системы	Свойство системы выполнять свои функции при выходе параметров внешних условий системы за определенные ограничения или допуски
	III группа — свойства, характеризующие методологию целеполагания системы
Надежность системы	Характеризуется сохраняемостью плановых значений параметров системы в течение запланированного периода времени
Оптимальность системы	Характеризует степень удовлетворения требований к системе, выполнение запланированных целей, обеспечивающих наилучшее использование потенциала системы
Наследственность системы	Характеризует закономерность передачи доминантных (преобладающих, наиболее сильных) и рецессивных признаков на отдельных этапах развития (эволюции) от старого поколения системы к новому. Выделение доминантных признаков системы позволяет повысить обоснованность направлений ее развития. Доминантные и рецессивные признаки, по сути, являются объективными

Продолжение табл. 1.7

1	2
Мультипликативность системы	Результаты проявления некоторых свойств системы определяются не сложением, а умножением относительных значений данного свойства каждого компонента системы
Уязвимость системы	Способность получать повреждения при воздействии внешних и (или) внутренних поражающих факторов
IV группа — свойства, характеризующие функционирование системы	
Синергичность системы	Эффективность функционирования системы не равна сумме эффективностей функционирования ее подсистем (компонентов). При отлаженном позитивном взаимодействии подсистем (компонентов) достигается положительный эффект синергии – эффект взаимодействия, к получению которого необходимо стремиться. Если сумма эффективностей подсистем (компонентов) больше эффективности системы в целом, эффект синергии отрицательный
Инерционность системы	Характеризуется скоростью изменения выходных параметров в ответ на изменение входных параметров, средним временем получения результата при внесении изменений в параметры функционирования
Адаптивность системы	Характеризует способность системы нормально (в соответствии с заданными параметрами) функционировать при изменении параметров внешней среды, приспособляемость системы к этим изменениям. Порог адаптации определяется максимальным уровнем (в процентах или долях) изменения параметров внешней среды, при котором система продолжает нормально функционировать
Организованность системы	Характеризуется степенью приближения в заданных условиях показателей пропорциональности, параллельности, непрерывности, прямоотности, ритмичности и других параметров организации производственных и управленческих процессов к оптимальному уровню
Уровень стандартизации системы	Характеризует совместимость и взаимозаменяемость данной системы с другими системами

Окончание табл. 1.7

1	2
Гибкость системы	Свойство системы изменять цель и параметры в зависимости от условий функционирования или состояния подсистем
Живучесть системы	Способность системы изменять цели или параметры функционирования при отказе и (или) повреждении элементов системы
Безопасность» системы	Способность системы не наносить недопустимые воздействия здоровью нации, персоналу, окружающей среде
Поведение системы	Способность системы переходить из одного состояния в другое
Равновесие системы	Способность системы в отсутствие внешних возмущающих воздействий сохранять свое поведение сколько угодно долго. Неравновесность порождает избирательность системы, ее необычные реакции на внешние воздействия среды. Неравновесные системы обретают способность воспринимать различия во внешней среде и «учитывать» их в своем функционировании. Так, некоторые воздействия, хотя и более слабые, могут оказывать большее воздействие на эволюцию системы, чем воздействия, хотя и более сильные, но не адекватные собственным тенденциям системы
Устойчивость системы	Способность системы возвращаться в состояние равновесия после того, как она из этого состояния была выведена
Управляемость системы	Способность системы управления своевременно и без искажений доводить управленческие команды до каждой подсистемы

Каждое изделие, в том числе и изделие военной техники, обладает совокупностью объективных свойств, определяющих его качество и обуславливающих пригодность изделия удовлетворять определенную потребность в соответствии с его назначением. Примером такой совокупности может быть множество свойств вооружения и военной техники, представленных в табл. 1.8, а также и ряд других их свойств.

Таблица 1.8

Свойство	Описание свойств системы (характеристика)
Боевая эффективность	Характеризует возможность выполнять боевые функции
Стойкость	Способность ВВТ к выполнению функций при воздействиях (и после их окончания) со стороны противника, сопрягаемых и других объектов, личного состава и окружающей (природной) среды
Живучесть	Способность ВВТ противостоять боевым и аварийным повреждениям, восстанавливать и поддерживать при этом свои боевые функции
Мобильность	Способность ВВТ к своевременному развертыванию, свертыванию, перемещению (передвижению)
Маневренность	Способность ВВТ к изменению скорости и направления движения с сохранением боевой готовности (боевая готовность - состояние ВВТ, характеризующее возможность их боевого применения в определенный момент времени)
Маскируемость	Приспособленность ВВТ к скрытию местоположения
Скрытность	Способность ВВТ противостоять обнаружению, установлению места их нахождения, характеристик и боевой принадлежности всеми видами разведки противника
Транспортабельность	Приспособленность ВВТ к перевозке различными видами транспорта и типами транспортных средств
Надежность	Свойство ВВТ сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования
Безотказность	Свойство ВВТ непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки
Долговечность	Свойство ВВТ сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта
Ремонтопригодность	Свойство ВВТ, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов
Сохраняемость	Свойство ВВТ сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтопригодности в течение и после хранения и (или) транспортирования
Безопасность при эксплуатации	Свойство ВВТ, проявляющееся в отсутствии (сведении к минимуму) риска нанесения ущерба здоровью личного состава, сопрягаемым и другим объектам, а также природной среде во всех режимах эксплуатации
Универсальность	Пригодность ВВТ к выполнению нескольких функций
Совместимость с сопрягаемыми объектами	Способность ВВТ взаимодействовать с сопрягаемыми объектами в установленных режимах эксплуатации с сохранением заданных характеристик без введения дополнительных сопрягающих устройств
Обитаемость	Свойство ВВТ, характеризующее условиями жизни и деятельности, обеспечивавшими сохранение здоровья, работоспособности личного состава и заданной эффективности эксплуатации (боевого применения)
Эргономичность	Свойство, характеризующее приспособленность к взаимодействию с человеком

При рассмотрении изделий военной техники как объектов исследований весьма важным является представление их посредством свойств, выделение среди них существенных свойств, оценивание степени проявления этих свойств и установление на основе полученных оценок пригодности изделий военной техники для применения по назначению. Чтобы изделие было пригодно для применения по назначению, необходимо обеспечить требуемый уровень его качества, решая задачу управления качеством изделий.

Качество любого изделия (уровень качества) формируется при его проектировании, обеспечивается в процессе изготовления изделия и поддерживается при его эксплуатации и ремонте (рис. 1.9). Поэтому на всех стадиях жизненного цикла изделий приходится решать задачи, связанные с обеспечением требуемого их качества и его оцениванием.

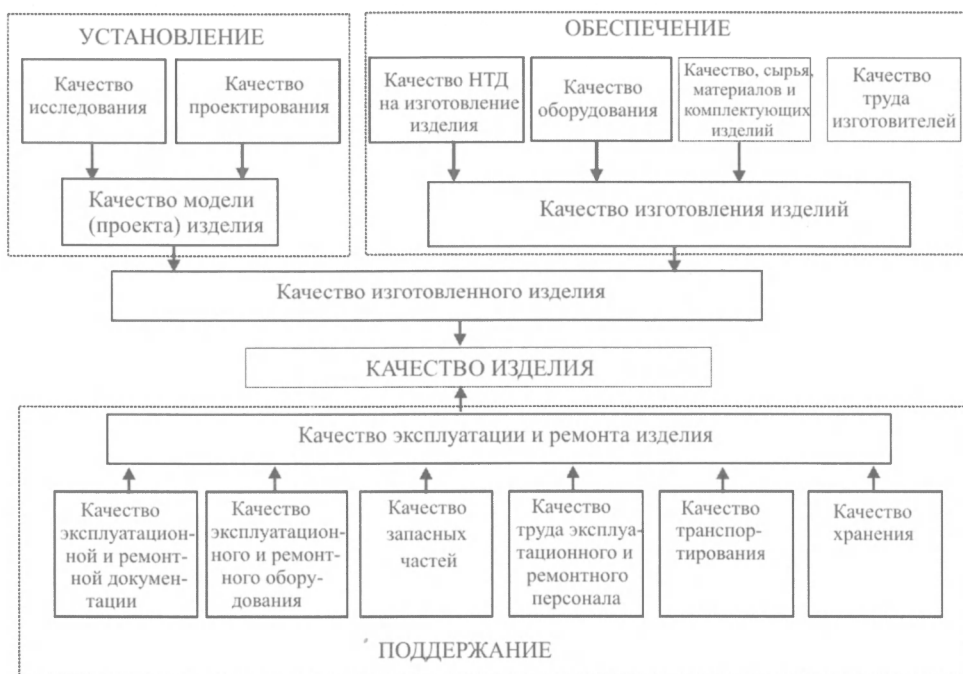


Рис. 1.9. Основные составные элементы установления, обеспечения и поддержания качества изделия

Научная область, объединяющая количественные методы оценивания качества, используемые для обоснования решений, принимаемых при управлении качеством изделий, называется *квалиметрией*. Основные задачи квалиметрии – определить номенклатуру необходимых показателей качества изделий и их оптимальные значения, а также разработать методы количественного оценивания качества, создать методику учета изменения качества во времени.

Основными положениями квалиметрии являются следующие утверждения.

1. Изделие характеризуется отдельными его свойствами – объективными особенностями, которые могут проявляться при создании изделия, его эксплуатации и применении по назначению. Эти свойства могут быть простыми и сложными. Сложные свойства разделяются на менее сложные, простые свойства на другие свойства не разделяются. Примером сложного свойства может быть *надежность*. Это свойство в зависимости от назначения изделия и условий его эксплуатации включает такие более простые свойства, как *безотказность*, *долговечность*, *ремонтопригодность* и *сохраняемость* в отдельности или определенное сочетание этих свойств как для изделия в целом, так и для его частей.

2. Качество изделия – совокупность его существенных свойств, обуславливающих пригодность изделия удовлетворять определенные потребности в соответствии с его назначением, поэтому качество рассматривается как наиболее сложное свойство.

3. Пригодность изделия оценивается исходя из цели его использования.

4. Качество изделия представляется в виде иерархической структуры свойств. На самом высоком уровне этой упорядоченной многоуровневой иерархической структуры находится качество, а на самом низком уровне – простые свойства. Эта структура может быть изображена в виде дерева свойств.

Дерево свойств – графическое представление иерархической структуры, состоящей из сложных свойств и связанных с ними групп более простых свойств (свойств более низкого ранга). Дерево свойств – это связный граф, выражавший соподчинение и взаимосвязи свойств, показывавший членение сложных свойств на более простые свойства, последние – на свойства следующего меньшего уровня сложности и т.д.

Существенные свойства системы условно классифицируют и по уровню сложности. При оценивании качества систем с управлением выделяют несколько уровней качества (шкалу уровней качества систем с управлением), проранжированных в порядке возрастания сложности рассматриваемых свойств. Эмпирические уровни качества получили названия: *устойчивость*, *помехоустойчивость*, *управляемость*, *способность*, *самоорганизация*. Порядковая шкала уровней качества и дерево свойств систем с управлением приведены в табл. 1.9.

Таблица 1.9

Уровни качества систем	Основные свойства систем	Простые свойства систем
1	2	3
1	Устойчивость	Прочность Гомеостаз Стойкость к воздействиям Сбалансированность Структурная устойчивость (техническая надежность, живучесть)
2	Помехоустойчивость	Надежность Пропускная способность Эффективное кодирование Электромагнитная совместимость

Окончание табл. 1.9

1	2	3
3	Управляемость	Инерционность Связность Гибкость Точность Наблюдаемость
4	Способность	Эффективность Результативность (мощность, производительность) Ресурсоемкость Оперативность
5	Самоорганизация	Самообучаемость Адаптируемость Распознавание ситуаций Свобода выбора решений

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

Первичным качеством любой системы является ее устойчивость. Для простых систем устойчивость объединяет такие свойства, как прочность, стойкость к внешним воздействиям, сбалансированность, стабильность, гомеостазис (способность системы возвращаться в равновесное состояние при выводе из него внешними воздействиями). Для сложных систем характерны различные формы структурной устойчивости, такие как надежность, живучесть и т.д.

Более сложным, чем устойчивость, является *помехоустойчивость*, понимаемая как способность системы без искажений воспринимать и передавать информационные потоки. Помехоустойчивость объединяет ряд свойств, присущих в основном системам управления. К таким свойствам относятся надежность информационных систем и систем связи – их пропускная способность, возможность эффективного кодирования/декодирования информации, электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и т. д.

Следующим качеством системы является *управляемость* – способность системы переходить за конечное (заданное) время в требуемое состояние под влиянием управляющих воздействий. Управляемость обеспечивается, прежде всего, наличием прямой и обратной связей, она объединяет такие свойства системы, как *гибкость* управления, *оперативность*, *точность*, *быстродействие*, *инерционность*, *связность*, *наблюдаемость* объекта управления и др. На этом уровне качества для сложных систем управляемость включает способность принятия решений по формированию управляющих воздействий. Следующим уровнем на шкале качеств является уровень, называемый *способностью*. Это качество системы, определяющее ее возможности по достижению требуемого результата на основе имеющихся ресурсов за определенное время. Данное качество определяется такими свойствами, как результативность (*производительность*, *мощность* и т.п.), ресурсоемкость и оперативность. Именно это качество определяется как потенциальная эффективность функционирования системы – способность получить требуемый результат при идеальном способе использования ресурсов и в отсутствии воздействий внешней среды.

Наиболее сложным качеством системы является *самоорганизация*. Самоорганизующаяся система способна изменять свою структуру, параметры, алгоритмы функционирования, поведение для повышения эффективности. Принципиально важными свойствами этого уровня являются свобода выбора решений, *адаптивность*, самообучаемость, способность к распознаванию ситуации.

Принцип свободы выбора решений предусматривает возможность изменения критериев на любом этапе принятия решений в соответствии со складывающейся обстановкой.

Введение уровней качества позволяет ограничить исследования одним из перечисленных уровней. Для простых систем часто ограничиваются исследованием устойчивости. Уровень качества выбирает исследователь в зависимости от сложности системы, целей исследования, наличия информации, условий применения системы.

Свойства проявляются лишь при взаимодействии изделия с человеком или с другими изделиями как при создании этого изделия, так и при его эксплуатации или применении по назначению. Поскольку чаще всего приходится иметь дело не с одним изделием, а со многими, то понятие качества включают не только свойства, присущие одному изделию, а некоторые свойства совокупности изделий (например, однородность, взаимозаменяемость, воспроизводимость и т.д.).

По степени универсальности различают специфические свойства, характерные только для некоторых изделий, и *всеобщие* свойства, характерные для всех изделий.

По сфере проявления, т.е. по тому, на каких стадиях жизненного цикла изделия и их этапах (при производстве, при эксплуатации, при транспортировании и т.д.) проявляют себя свойства, различают свойства, проявляющиеся в сфере производства; свойства, проявляющиеся в сфере эксплуатации; свойства, проявляющиеся при применении изделия по назначению и т.д.

В зависимости от функциональной роли выделяют целевые, ограничительные и технико-экономические свойства. Целевые свойства определяют возможности изделия удовлетворять конкретные потребности. Ограничительные свойства характеризуют условия эксплуатации, при которых гарантируется сохраняемость изделия и безопасность его применения (эксплуатации).

Технико-экономические свойства определяют возможную степень удовлетворения потребностей и суммарные экономические затраты.

Целевыми свойствами являются:

основные свойства, характеризующие основное назначение изделия;

конкретизирующие свойства, характеризующие уровень специализации изделия;

дополнительные свойства, характеризующие целевой диапазон использования изделия.

Ограничительные свойства включают:

внешние эксплуатационные свойства, которые характеризуют внешние условия эксплуатации;

производственно-технические ограничительные свойства (грузоподъемность, тяговое усилие);

ограничительные свойства безопасности эксплуатации – свойства, характеризующие условия, при которых обеспечивается безопасность эксплуатации изделия.

Технико-экономические свойства проявляются в сфере производства, либо при эксплуатации, либо в сфере обращения.

В сфере производства основным технико-экономическим свойством является технологичность изделия.

Технологичность – это соответствие конструкции изделия требованиям экономической технологии его изготовления или свойство, определяющее степень сложности использования производственных методов и процессов при изготовлении изделия. Технологичным называют такое изделие, которое, обладая необходимыми целевыми, ограничительными и эксплуатационными свойствами, позволяет при данной серийности производства изготовить его с наименьшими затратами труда, материалов и времени (с наименьшим производственным циклом). Технологичность – сложное свойство, включавшее в себя многие простые свойства (трудоемкость, фондоемкость, материалоемкость, энергоемкость, уровень стандартизации и унификации и др.). В сфере обращения изделие можно так же характеризовать одним сложным свойством – *приспособленностью к транспортированию*, которое можно разделить на два простых: транспортабельность и сохраняемость.

Основными технико-экономическими свойствами, характерными для этапа эксплуатации, являются: производительность, качественная работоспособность, надежность, непрерывность работы, экономичность, эстетичность, потребляемость ресурсов (ресурсопотребность), ремонтосложность. Все эти свойства сложные и состоят из более простых.

В табл. 1.10. представлены характеристики (определения) технико-экономических свойств этапа эксплуатации.

Таблица 1.10

Технико-экономические свойства	Определение (характеристика) свойства
1	2
Производительность	Способность изделия выполнять определенный объем работы в единицу времени (скорость, быстрдействие, мощность и т.д.)
Качественная работоспособность	Отражает качество выполнения работы: достоверность, точность, информативность и другие свойства
Надежность	Свойство объекта, заключающееся в способности сохранять во времени в установленных пределах значения признаков и параметров, характеризующих те свойства объекта, которые определяют его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях. Надежность включает в себя четыре свойства более низкого ранга: безотказность, ремонтпригодность (восстанавливаемость), долговечность и сохраняемость
Непрерывность работы	Связана со временем, в течение которого изделие может работать непрерывно, не снижая своих показателей
Эргономичность	Сложное свойство, которое характеризует приспособленность изделия к взаимодействию с человеком. Оно определяет напряженность и интенсивность труда обслуживавшего персонала. В эргономичность входят более простые свойства, такие, как степень механизации, степень автоматизации, комфортабельность, удобство работы и др.

Окончание табл. 1.10

1	2
Эстетичность	Сложное свойство, оказывавшее влияние на чувственное восприятие человеком всего изделия в целом с точки зрения его внешнего вида. Эстетичность обуславливается такими простыми свойствами, как форма, гармония, композиция и т.д.
Ресурсопотребность	Потребляемость ресурсов во время эксплуатации. Ресурсопотребность включает в себя ряд свойств более низкого ранга: трудоемкость, энергоемкость, топливеемкость, материалоемкость, фондоемкость
Ремонтосложность	Трудоемкость и материалоемкость ремонта

Технологичность и ресурсопотребность в совокупности определяют экономические затраты на изготовление и эксплуатацию изделия. Остальные свойства определяют технические характеристики изделия.

Технико-экономические сложные свойства имеют, как правило, универсальный характер. Целевые и ограничительные свойства являются специфическими для каждого типа изделия, так как отражают специфику использования и условия эксплуатации конкретного изделия.

1.4.2. Показатели и критерии оценивания качества изделий

При делении существенных свойств системы на системообразующие (общесистемные), структурные или функциональные группы показатели качества относят к области общесистемных и структурных свойств систем (табл. 1.11.).

Таблица 1.11

Наименование групп свойств	Наименование свойств
Общесистемная	Целостность, устойчивость, наблюдаемость, управляемость, детерминированность, открытость, динамичность и т.д.
Структурная	Состав, связность, организация, сложность, масштабность, пространственный размах, централизованность, объем и т.д.
Функциональная (поведенческая)	Результативность, ресурсоемкость, оперативность, активность, мощность, мобильность, производительность, быстродействие, готовность, работоспособность, точность, экономичность и т.д.

Свойства, характеризующие процесс функционирования (поведение) системы, называют *операционными свойствами* или свойствами операции, поскольку искусственные системы создаются для выполнения конкретных операций или функций.

В области разработки оценок качества функционирования систем значительные результаты получены в теории исследования операций, в терминах которой искусственная система создается для выполнения операции. Эти результаты используют в теории систем и системном анализе.

Качество как обобщенное свойство изделия само по себе еще не характеризует степень его соответствия назначению. Для характеристики уровня качества изделия вводятся показатели его свойств и качества изделия в целом. Если удастся

вести количественные характеристики и связать аналитическим выражением цель системы и средства ее достижения, то такие выражения называют *критерием эффективности, критерием функционирования, целевой функцией* и т.п.

Однако получить требуемые аналитические выражения и зависимости для оценки сложных систем с активными элементами крайне сложно, а часто и практически невозможно. Поэтому целесообразно рассмотреть различные подходы к трактовке и классификации критериев оценки эффективности систем.

При оценке систем различают качество систем и эффективность реализуемых системами процессов. Соответственно вводят критерии качества и показатели и критерии эффективности.

Критерии оценки систем – правила или норма, позволяющие оценить эффективность системы, соответствие требуемого и достигаемого результатов.

Для пояснения принципа классификации критериев качества введем ряд понятий.

Пусть каждое i -е качество j -й системы ($i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$) может быть описано с помощью некоторой выходной переменной y_i^j , отображающей определенное существенное свойство системы, значение которой характеризует меру (интенсивность) этого качества. Эту меру назовем *показателем свойства* или *частным показателем качества системы*. Показатель y_i^j может принимать значения из множества (области) допустимых значений $\{y_i^{\text{доп}}\}$. Обобщенным показателем качества j -й системы называют вектор $y_j^j = \langle y_1^j, y_2^j, \dots, y_n^j \rangle$, компоненты которого суть показатели его отдельных свойств. Размерность этого вектора определяется числом существенных свойств системы. Показатель качества именно вектор, а не простое множество частных показателей, поскольку между отдельными свойствами могут существовать связи, которые в рамках теории множеств описать весьма сложно.

Частные показатели имеют различную физическую природу и в соответствии с этим – различную размерность. Поэтому при образовании обобщенного показателя качества следует оперировать не с «натуральными» показателями, а с их нормированными значениями, обеспечивающими приведение показателей к одному масштабу, что необходимо для их сопоставления.

Задача нормировки решается, как правило, введением относительных безразмерных показателей, представляющих собой отношение «натурального» частного показателя к некоторой нормирующей величине, измеряемой в тех же единицах, что и сам показатель

$$y_i^{\text{норм}} = \frac{y_i}{y_i^0},$$

где y_i^0 – некоторое «идеальное» значение i -го показателя.

Выбор нормирующего делителя для перевода частных показателей в безразмерную форму в значительной мере носит субъективный характер и должен обосновываться в каждом конкретном случае. Возможны несколько подходов к выбору нормирующего делителя.

Во-первых, нормирующий делитель y_i^0 можно задавать с помощью ЛПР, и это предполагает, что значение y_i^0 является образцовым.

Во-вторых, можно принять, что нормирующий делитель $y_i^0 = \max y_i^j$.

В-третьих, в качестве нормирующего делителя может быть выбрана разность между максимальными и минимальными допустимыми значениями частного показателя.

Показатель – это особого вида понятие, которое выражает количественную сторону явлений, процессов и объектов материального мира в единстве с их качественной определенностью. По своему характеру показатели могут быть как количественными, так и качественными. Показатель называют количественным, если его значение имеет смысл сравнивать, указывая, на сколько или во сколько раз одно его значение больше (меньше) другого. Количественный показатель всегда характеризуется количественной величиной (числом) и поэтому его еще называют числовым показателем.

Показатель называют *качественным*, когда его значения описываются словесно и по ним можно только судить о том, чем одно значение показателя отличается от другого. Качественный показатель формально можно перевести в числовой (но не в количественный), приписав его словесно описанным значениям некоторые числа.

Различают скалярный и векторный показатели, а векторные показатели разделяют на простые и составные. Показатель называют *скалярным*, если он представляет собой некоторую скалярную величину. Если показатель является совокупностью скалярных величин, то его называют *простым векторным* показателем.

Совокупность простых векторных показателей образует составной векторный показатель, формально этот показатель, если его представить в виде одной совокупности всех скалярных показателей, входящих в простые векторные, также является простым векторным показателем.

Простые векторные показатели, входящие в составной векторный показатель, а также скалярные показатели, входящие в простой векторный показатель, называют *частными* показателями (соответственно векторными и скалярными). В связи с этим составной векторный показатель называют еще общим векторным показателем.

Если векторный показатель (простой или составной) удастся каким-либо образом свернуть в один скалярный, то такой показатель называют *обобщенным* скалярным показателем.

Свойство как объективную особенность изделия можно описывать качественно или количественно.

Показатель свойства изделия – это количественная характеристика одного из свойств изделия, оценивающая степень проявления этого свойства. Показатель свойства выступает как мера этого свойства. Являясь внешним выражением свойства в конкретных условиях, он позволяет судить о наличии самого свойства. Поскольку свойство – это некоторая часть целого качества, то и показатель свойства – это показатель не всего целого (качества), а только некоторой части (простого или сложного свойства).

Качество изделия, представляемое совокупностью свойств относительно его назначения, характеризуется соответственно совокупностью значений показателей свойств, составляющих качество изделия и обуславливающих его пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии со своим назначением. Эта совокупность значений показателей свойств изделия количественно выражает его качество и поэтому может быть названа *показатель качества изделия*. Следовательно, в общем случае показатель качества изделия – это вектор, компонентами которого являются показатели его свойств.

В частном случае, когда применительно к назначению изделия существенным является лишь одно его свойство, показатель качества содержит один компонент, т.е. оказывается скалярным, поскольку качество изделия определяется как совокупность его существенных свойств, то оно, в свою очередь, может быть представлено как обобщенное свойство изделия. В связи с этим показатель качества может трактоваться как показатель обобщенного свойства изделия. Поэтому важнейшим при оценивании качества какого-либо изделия является объединение многих его существенных свойств в одно сложное свойство, мера которого позволяла бы дать однозначное заключение о соответствии исследуемого изделия своему назначению. Такое объединение свойств требует всестороннего изучения зависимостей между характеризующими их показателями.

Показатели отдельных существенных свойств изделия являются частными показателями его качества, поскольку каждый из них характеризует какую-то одну сторону изделия, а не изделие в целом.

Показателем качества изделия (частным или комплексным) называют количественную характеристику одного или нескольких свойств изделия, составляющих его качество, рассматриваемую применительно к определенным условиям создания изделия, его эксплуатации или применении по назначению.

Показатель качества изделия численно характеризует степень проявления определенного свойства, входящего в состав качества. Его наименование определяет характеризуемое свойство. Численные значения показателя могут выражаться как в размерных единицах, так и в безразмерных.

В зависимости от свойств изделия его частные показатели качества можно представить одним из двух следующих классов: 1) показатели качества, которые можно измерить объективными средствами; 2) показатели качества, которые не удастся определить объективными средствами. В последнем случае численные значения показателей качества, являющихся качественными (а не количественными) показателями, определяются квалифицированными экспертами путем так называемых субъективных измерений и выражаются в единицах-баллах.

Многообразие задач и целей оценивания технического уровня и качества изделий вызывает необходимость классификации показателей качества по различным признакам: по характеризующим свойствам (показатели назначения, показатели надежности, эргономические показатели, показатели транспортабельности, показатели технологичности, экономические показатели и т.д.); по способу выражения (показатели, выраженные в натуральных единицах, безразмерные показатели, показатели, выраженные в стоимостных единицах); по числу характеризующих

свойств (единичные показатели, комплексные показатели); по применению для оценивания (базовые значения показателей, относительные значения показателей); по стадии определения значений показателей (прогнозируемые показатели, проектные показатели, производственные показатели, эксплуатационные показатели).

По числу характеризующих свойств (степени укрупнения) выделяются единичные и комплексные (групповые, обобщенные, интегральные) показатели качества. Показатель качества, характеризующий одно из свойств изделия, называется *единичным* показателем.

Комплексным называется показатель качества изделия, характеризующий несколько его свойств.

Показатель качества изделия, по которому принимают решение оценивать его качество, называется *определяющим* показателем. Определяющий показатель качества может быть единичным и комплексным.

Комплексный определяющий показатель качества, относящийся только к одной группе его родственных свойств, называется *групповым*.

Показатели качества используют при оценивании уровня качества изделия, а также при обосновании требований к ним.

Уровень качества изделия – относительная характеристика качества изделия, основанная на сравнении значений показателей качества оцениваемого изделия с базовыми значениями соответствующих показателей.

Базовое значение показателя качества – это значение показателя качества изделия, принятое за основу при сравнительном оценивании его качества.

Показатель качества количественно характеризует пригодность изделия удовлетворять определенные потребности. Им может быть лишь такая характеристика изделия, которая связана с его качеством строго монотонной зависимостью: чем больше или меньше в зависимости от смыслового содержания значение показателя качества, тем лучше изделие при прочих равных условиях.

Требования к показателям качества изделий формируются в ТТЗ на разработку таким образом, чтобы была исключена возможность их неоднозначного толкования и субъективного оценивания качества изделий. Значения показателей качества указываются с допустимыми отклонениями или задаются в виде максимальных и минимальных значений. При стохастической природе характеризующего свойства указывается вероятность нахождения значений соответствующей величины в заданных пределах.

При оценивании качества изделий руководствуются выработанными квалиметрией принципами, которые позволяют обоснованно подходить к выбору показателей качества, методам их оценивания, способам сравнения изделий по качеству и обеспечивают единообразие при оценивании качества изделий, т.е. единство и точность измерения качества. Положения квалиметрии могут быть дополнены следующими утверждениями относительно показателей качества изделий и измерений их значений.

1. Отдельные свойства (простые или сложные, включая и само качество как наиболее общее сложное свойство) могут быть измерены в определенных единицах измерения. В результате такого измерения определяются абсолютные значения показателей качества.

2. Измерение, т.е. установление абсолютных значений показателей качества может производиться:

на основе физических экспериментов – методами метрологии;

на основе психологических экспериментов – методами субъективных измерений экспериментальной психологии (экспертное измерение свойств);

на основе построения аналитических моделей функционирования изделия.

3. Кроме абсолютного значения показателя каждое простое или каждое сложное свойство может характеризоваться и относительным значением показателя, выявляющим степень пригодности изделия для использования по назначению или соотношение с аналогичным показателем другого изделия. Этот относительный показатель определяется сопоставлением абсолютного значения показателя с базовым значением. Наряду с абсолютным и относительным значениями показателя каждое простое или сложное свойство характеризуется также своей весомостью (значимостью, важностью) среди всех остальных свойств, а показатель качества – коэффициентом весомости, который является количественной характеристикой значимости данного показателя качества изделия среди других показателей его качества.

4. Количественной характеристикой качества является уровень качества изделия, основанный на сравнении значений показателей качества оцениваемого изделия с базовыми значениями соответствующих показателей.

5. Значение уровня качества может быть представлено как некоторая функция относительных значений показателей и коэффициентов весомости, которая может выражать различные зависимости в виде средневзвешенной (арифметической, геометрической, гармонической и др.) величины, полинома и т.д. Кроме того, значение уровня качества может быть представлено не в скалярной, а в векторной форме.

Различают прямые задачи квалиметрии (или задачи анализа качества изделий) и обратные задачи – задачи синтеза изделий с заданным (требуемым) качеством. Основу *прямой задачи* составляет измерение качества изделия, а основу *обратной задачи* – управление качеством изделия с целью придания ему необходимых свойств и требуемой степени их проявления.

Требуемое качество изделий (системы) задается условиями (правилами), которым должны удовлетворять значения их показателей качества существенных свойств, а проверка их выполнения называется оцениванием качества системы. Эти условия называются критериями оценивания качества изделий, а процедура проверки их выполнимости – оцениванием качества изделий. Таким образом, *критерий качества – это показатель существенных свойств системы и правило его оценивания*.

Критерии дают правила, на основании которых одно значение вектора показателей свойств следует считать лучшим (или худшим) другого его значения.

Назовем *идеальной системой* гипотетическую модель исследуемой системы, идеально соответствующую всем критериям качества, $\mathbf{y}_i^* = \langle y_1^*, y_2^*, \dots, y_i^*, \dots, y_n^* \rangle$ – вектор, являющийся показателем качества идеальной системы, а *областью адекватности* – некоторую окрестность значений показателей существенных свойств.

В общем виде область адекватности определяется как модуль нормированной разности между показателем качества $Y^{\text{доп}}$ и показателем качества Y^* :

$$\delta \subseteq |Y^{\text{доп}}/Y^*|/|Y^*|,$$

где δ – радиус области адекватности.

На радиус области адекватности накладываются ограничения, зависящие от семантики предметной области. Как правило, определение этой величины является результатом фундаментальных научных исследований или экспертной оценки.

В зависимости от типа систем и внешних воздействий операции могут быть детерминированными, вероятностными или неопределенными. В соответствии с этим выделяют три группы показателей и критериев эффективности:

1) показатели и критерии эффективности функционирования систем в условиях определенности, если показатели исхода операции отражают один строго определенный исход детерминированной операции;

2) показатели и критерии эффективности функционирования систем в условиях риска, если показатели исхода операции являются дискретными или непрерывными случайными величинами с известными законами распределения в вероятностной операции;

3) показатели и критерии эффективности функционирования систем в условиях неопределенности, если показатели исхода операции являются случайными величинами, законы распределения которых неизвестны.

Множество критериев, применяемых при оценивании качества изделий, разделяется на три класса: критерии пригодности, критерии превосходства, критерии оптимальности.

Рассмотрим классы критериев оценивания качества систем.

1. Критерий пригодности $K^{\text{приг}}$ ($\forall i$) ($y_i^j \in \delta \mid \delta_i \rightarrow y_i^{\text{доп}}, i=1, \dots, n$), правило, согласно которому j -я система считается пригодной, если значения всех i -х частных показателей y_i^j этой системы принадлежат области адекватности δ , а радиус области адекватности соответствует допустимым значениям всех частных показателей.

2. Критерий пригодности для оценки детерминированной операции имеет вид $K^{\text{приг}}: (\forall i) (y_i^h \in \delta \mid \delta_i \rightarrow y_i^{\text{доп}}, i \in \mathcal{E}, R, O >)$. Критерий определяет правило, по которому операция считается эффективной, если все частные показатели исхода операции принадлежат области адекватности.

3. Критерий пригодности для оценки эффективности вероятностной операции имеет вид $K^{\text{приг}}: P_{\text{ДЦ}}(Y_{\text{эфф}}) \geq P_{\text{ДЦ}}^{\text{треб}}(Y_{\text{эфф}})$. Критерий определяет правило, по которому операция считается эффективной, если вероятность достижения цели по показателям эффективности $P_{\text{ДЦ}}(Y_{\text{эфф}})$ не меньше требуемой вероятности достижения цели по этим показателям $P_{\text{ДЦ}}^{\text{треб}}(Y_{\text{эфф}})$.

4. Критерий оптимальности $K^{\text{опт}}: (\exists i)(y_i^j \in \delta \mid \delta_i \rightarrow \delta^{\text{опт}})$, правило, согласно которому j -я система считается оптимальной по i -му показателю качества, если

существует хотя бы один частный показатель качества y_i^j , значение которого принадлежит области адекватности δ , а радиус области адекватности по этому показателю оптимален. Оптимальность радиуса адекватности определяется из семантики предметной области, как правило, в виде $\delta^{\text{опт}} = 0$, что подразумевает отсутствие отклонений показателей качества от идеальных значений.

5. *Критерий оптимальности для оценки детерминированной операции* имеет вид $K^{\text{опт}}: (\exists i)(y_i^j \in \delta \mid \delta_i \rightarrow \delta_i^{\text{опт}}, i \in \langle \mathcal{A}, R, O \rangle)$, где $\mathcal{A}$, R , O – показатели результативности, ресурсоемкости, оперативности соответственно. Критерий определяет правило, по которому операция считается эффективной, если все частные показатели исхода операции принадлежат области адекватности, а радиус области адекватности по этим показателям оптимален.

6. *Критерий оптимальности для оценки эффективности вероятностной операции* имеет вид $K^{\text{опт}}: P_{\text{ДЦ}}(Y_{\text{эфф}}) \geq P_{\text{ДЦ}}^{\text{тр}^{\text{б}}}(Y_{\text{опт}})$. Критерий определяет правило, по которому операция считается эффективной, если вероятность достижения цели по показателям эффективности $P_{\text{ДЦ}}(Y_{\text{эфф}})$ равна вероятности достижения цели с оптимальными значениями этих показателей $P_{\text{ДЦ}}^{\text{тр}^{\text{б}}}(Y_{\text{опт}})$.

7. *Критерий превосходства* $K^{\text{прев}}: (\forall i)(y_i^j \in \delta \mid \delta_i \rightarrow \delta_i^{\text{опт}})$ правило, согласно которому j -я система считается превосходной, если все значения частных показателей качества y_i^j принадлежат области адекватности δ , а радиус области адекватности оптимален по всем показателям.

Иллюстрация приведенных формулировок приведена на рис. 1.10, где по свойствам y_1 и y_2 сравниваются характеристики пяти систем $\{Y^1, Y^2, Y^3, Y^4, Y^5\}$, имеющие допустимые области адекватности значений $\{y_i^j, y_i''\}$, $i=1, 2$, для которых определены оптимальные значения $y_1^{\text{опт}}$, $y_2^{\text{опт}}$ соответственно. Из рис. 1.10 видно, что системы 1, 2, 3, 5 пригодны по свойствам y_1 и y_2 . Системы 1 и 3 оптимальны по свойству y_1 и y_2 .

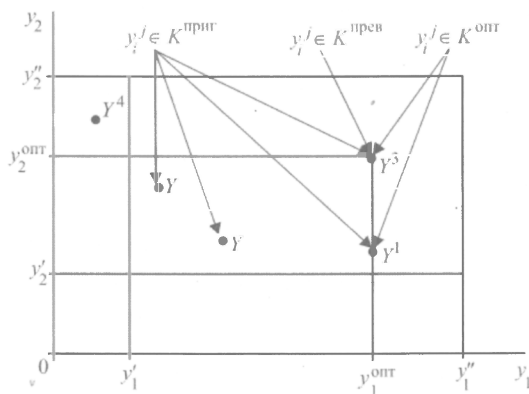


Рис. 1.10. Пример оценок систем по критериям пригодности, оптимальности и превосходства

Системы 1, 2, 3, 5 пригодны по свойствам y_1 и y_2 . Системы 1 и 3 оптимальны по свойству y_1 и y_2 .

Система 3 является превосходной, несмотря на то, что имеет место соотношение y_2^4 и y_2^3 , поскольку 4-я система вообще не пригодна и, следовательно, неконкурентоспособна по сравнению с остальными.

Критерий превосходства является частным случаем критерия оптимальности, который в свою очередь является частным случаем

критерия пригодности, поскольку область адекватности по критерию пригодности представляет собой декартово произведение множеств $\langle y'_1, y''_2 \rangle \times \langle y'_2, y''_2 \rangle$, по критерию оптимальности она вырождается в двухточечное множество $\langle y_1^{\text{опт}}, y_2^{\text{опт}} \rangle$, а по критерию превосходства вырождается в точку превосходства.

Критерии оптимальности и превосходства представляют собой частные случаи критерия пригодности или формально $K^{\text{прев}} \in K^{\text{опт}} \in K^{\text{приг}}$.

Основными задачами оценивания качества изделия являются задачи оценивания его пригодности и предпочтительности. При оценивании пригодности или предпочтительности изделия исходят из цели его использования. Оценивание пригодности изделия состоит в сопоставлении значений показателей качества с допустимыми (граничными) значениями этих показателей.

Необходимо отметить, что более широким понятием, чем пригодность изделия, является понятие его приемлемости, так как по отношению к цели использования изделие может быть пригодным, но по каким-то другим соображениям оно оказывается неприемлемым.

Оценивание предпочтительности изделия может осуществляться как с целью упорядочения изделий по предпочтительности, так и с целью выявления наиболее предпочтительного изделия. Задачу оценивания предпочтительности изделий, решаемую с целью упорядочения изделий по предпочтительности, называют задачей *оценивания превосходства* изделия. Ту же задачу, решаемую с целью выявления наиболее предпочтительных в каком-то определенном смысле изделий, называют задачей *оценивания оптимальности* изделия. Поэтому при оценивании качества изделий критерий пригодности должен быть доминирующим.

Качество изделия и показатель качества – это различные понятия. Показатель качества означает меру качества, критерий оценивания качества – условия, которым должны удовлетворять значения показателей качества. Оценка качества – числовое значение показателя качества, а оценивание качества – процедура принятия решения о качестве изделия. При этом схему исследования изделия, в соответствии с которой определяется оценка показателя качества (мера качества), целесообразно назвать *разомкнутой*. В разомкнутой схеме качество изделия лишь измеряется, но не оценивается. Оценивание качества изделия возможно только в *замкнутой* схеме, т.е. когда к качеству предъявлены требования. Именно они «замыкают» схему. Эта задача решается с помощью критериев оценивания качества.

1.4.3. Классификация показателей качества изделий

По характеризующим свойствам выделяют следующие основные группы показателей качества изделий:

- цель и область применения изделия показатели назначения;
- приспособленность изделия к эксплуатации и сохранению работоспособности: показатели живучести и стойкости к внешним воздействиям; показатели надежности; эргономические показатели и показатели технической эстетики; показатели удобства технического обслуживания, ремонта и хранения; показатели транспортабельности; показатели безопасности; показатели скрытности и маскировки;

рациональность технико-экономических решений в изделии: показатели стандартизации и унификации; показатели технологичности; конструктивные показатели; экономические показатели.

Для всякого изделия первичным является его назначение и только указав назначение изделия можно говорить о том, в какой мере данное изделие отвечает своему назначению, т.е. насколько оно качественно.

Показатель назначения изделия – это показатель качества, характеризующий эффект применения изделия по назначению в конкретной эксплуатационной (в частности, боевой) ситуации. Показатели назначения характеризуют свойства изделия, полезные в смысле его прямого назначения, его функций. Показатели назначения или функционально обусловленные показатели играют основную роль при оценивании уровня качества изделий. Они характеризуют эффект применения изделия по назначению в конкретных условиях; свойства, определяющие основные функции изделия, и обуславливают область его применения. Показатели назначения рассматриваются при оценивании уровня качества всех изделий, и в зависимости от специфических особенностей конкретного изделия характеризуют его тактические и (или) технические возможности.

К *показателям живучести* относятся показатели качества, характеризующие способность изделия выполнять свои функции при повреждениях и аварийных ситуациях, способность изделия к транспортированию, среднюю продолжительность установки изделия на средство транспортирования определенного вида, допустимые механические воздействия при транспортировании, продолжительность приведения изделия в состояние готовности к применению по назначению после транспортирования и т.д.

Показатели качества, характеризующие конструктивно-технические особенности изделия, обуславливающие безопасность обслуживавшего персонала, сопрягаемых и других объектов, а также природной среды на всех объектах эксплуатации изделия, составляют группу *показателей безопасности* (вероятность безопасной работы в течение определенного времени, время срабатывания защитных устройств, электрическая прочность изоляции токоведущих частей изделия, вероятность возникновения аварийной ситуации и т.д.),

Показатели скрытности и маскировки характеризуют приспособленность изделия к скрытию (или ложной имитации) своей дислокации, назначения, состава, структуры и параметров (вероятность обнаружения изделия техническими средствами, среднее время обнаружения изделия, уровень демаскирующих излучений изделия и т.д.).

Показатели стандартизации и унификации – это показатели качества, характеризующие уровень стандартизации, внутрипроектной и межпроектной унификации изделий (коэффициент применяемости, коэффициент повторяемости, коэффициент межпроектной унификации). Показатели этой группы определяют насыщенность изделия стандартными, унифицированными, заимствованными и оригинальными составными частями, а также уровень унификации с другими изделиями.

К *показателям технологичности* относятся показатели качества, характеризующие системно-структурные свойства изделия, обуславливающие оптимальное

распределение затрат материалов, средств, труда и времени при технологической подготовке производства и изготовлении изделия (удельный вес прогрессивных методов сборки, трудоемкость изготовления изделия, удельная материалоемкость изделия, коэффициент использования материала и т.д.).

Конструктивные показатели характеризуют конструктивные особенности изделия, обуславливающие возможность реализации в изделии комплекса его функциональных свойств (габаритные, установочные).

Показатели стойкости к внешним воздействиям характеризуют способность изделия сохранять работоспособность при специально создаваемых и естественных внешних воздействиях.

Показателями надежности называются показатели качества, характеризующие способность изделия сохранять значения эксплуатационных показателей на определенном уровне в заданном интервале времени (наработки) при установленных режимах и условиях использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования (показатели безотказности, долговечности, показатели ремонтпригодности, сохраняемости, комплексные показатели надежности).

Эргономические показатели – это показатели качества, характеризующие приспособленность изделия к эксплуатации человеком (показатели обитаемости, антропометрические показатели, физиологические и психофизиологические показатели, психологические показатели).

Показатели технической эстетики характеризуют композиционную целостность, информационную выразительность, рациональность формы и совершенство производственного исполнения изделия (показатели композиционной целостности, показатели информационной выразительности, показатели рациональности формы, показатели совершенства производственного исполнения).

Показатели качества, характеризующие свойства изделия, обуславливающие потребные затраты материалов, средств, труда и времени, а также требуемую квалификацию обслуживающего персонала при техническом обслуживании, ремонте и хранении изделия, относятся к *показателям удобства* технического обслуживания, ремонта и хранения.

Показатели транспортабельности – это показатели качества, характеризующие приспособленность изделия к перемещению, не сопровождающемуся его использованием, а также к подготовительным или заключительным операциям, связанным с транспортированием (масса, габаритные размеры, допустимая температура и давление при транспортировании, средняя продолжительность подготовки и присоединительные размеры, коэффициент сборности (блочности) изделия, вид исполнения: контейнерное, блочное, моноблочное и т.д.). Они определяют качество основных проектно-конструкторских решений и характеризуют удобство монтажа и установки изделия, возможность его агрегатирования.

Экономические показатели – это показатели, характеризующие затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию изделия, а также экономическую эффективность его эксплуатации. Экономические показатели – особый вид показателей, так как они практически взаимосвязаны со всеми основными группами показателей (назначения, надежности, технологичности и т.д.). С помощью экономических

показателей при оценивании уровня качества можно отразить не только затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию, но и другие свойства изделия. Например, экономические показатели в стоимостном отношении характеризуют: технологичность – относительной технологической себестоимостью заготовительных работ; удобство технического обслуживания – удельной себестоимостью обслуживания функционирующего изделия; уровень стандартизации и унификации – стоимостным коэффициентом: применяемости и т.д.

В качестве основных экономических показателей, используемых при технико-экономическом анализе изделий, рассматривают стоимостные и временные показатели. Стоимостные показатели характеризуют расход материально-вещественных и других ресурсов в денежном выражении, а временные показатели – продолжительность выполняемого организационно-технического мероприятия.

Экономические показатели, используемые при анализе качества изделий и выполняемых организационно-технических мероприятий, весьма разнообразны. Среди широкой номенклатуры экономических показателей можно выделить такие наиболее употребительные, как полная стоимость жизненного цикла изделия, стоимость разработки изделия, плановая условная цена изделия в серийном производстве, стоимость и продолжительность подготовки и освоения серийного производства, показатели эксплуатационных расходов, себестоимость изделия, капитальные вложения, приведенные затраты и другие показатели.

Экономические показатели характеризуют, с одной стороны, затраты, необходимые для придания изделию требуемых свойств, а с другой стороны – экономический эффект от его применения.

При выборе номенклатуры показателей качества изделия исходят из цели использования показателей качества, назначения и условий эксплуатации изделия. В зависимости от специфических особенностей изделия, его изготовления и использования некоторые из указанных выше групп показателей (кроме показателей назначения) или отдельные показатели качества могут быть исключены из рассмотрения.

При необходимости вводятся дополнительные группы показателей, характерные для рассматриваемого изделия. Например, выделяются показатели метрологического обеспечения изделия (условные вероятности необнаруженного и ложного отказов, вероятность правильного обнаружения отказавшей составной части изделия, продолжительность и периодичность измерений или измерительного контроля, показатели контроля пригодности изделия и т.д.).

Требования к показателям качества изделий устанавливаются в тактико-технических заданиях на их разработку.

1.5. Качество и эффективность операций, выполняемых военно-технической системой

1.5.1. Основы теории эффективности и исследования операций

Исторически понятие эффективности возникло в военном деле в рамках исследования операций и применялось для оценивания оптимальности (целесообразности) операции, выполняемой некоторой системой. В настоящее время к объектам изу-

чения теории эффективности относят целенаправленные действия и целенаправленные системы, а в качестве предмета исследования выделяют закономерности оптимальной организации операции. Фундаментальными понятиями, используемыми теорией эффективности, наряду с понятиями эффекта и эффективности, являются понятия цели, операции и системы.

Под *целью* понимается желаемый результат деятельности, достижимый в пределах некоторого интервала времени и имеющий определенную полезность.

Понятие цели чаще всего неформализуемо и формулируется в виде необходимости достижения предпочтительного состояния некоторой системы или внешней среда. Цель считается достигнутой, если получен определенный, соответствующий поставленной цели результат.

Достижение цели состоит из решения некоторой совокупности задач, позволявших получить результат, соответствующий поставленной цели.

Задача – промежуточный этап достижения цели, направленный на получение конкретного результата за некоторый назначенный (заданный) промежуток времени. Результат выполнения задачи характеризуется набором количественных данных или параметров этого результата. В соответствии с приведенными выше определениями цель становится задачей, если указан (задан, принят) срок ее достижения и конкретизированы количественные характеристики желаемого результата. Вообще же цель выступает как более общая категория, чем задача. Цель – это не что иное, как декларация о требуемом результате. Поскольку цель достигается путем решения ряда задач, то в связи с этим задачи можно упорядочить по отношению к цели.

Последовательность достигаемых и ставящихся затем все более совершенных в каком-либо смысле целей образует направление развития.

Требуемый результат получают путем преобразования некоторых ресурсов, т.е. за счет совокупности действий, в процессе выполнения которых ресурсы преобразуются в требуемый результат. Данная совокупность действий называется операцией.

Операция – это упорядоченная целесообразная совокупность взаимосвязанных действий, объединенных единым замыслом и направленных на достижение определенной цели, причем в процессе выполнения этих действий осуществляется преобразование некоторых ресурсов в требуемый результат. Примерами операций в военном деле могут служить: стрельба по воздушной цели; отражение воздушного налета средствами ПВО; обнаружение воздушной цели РЛС; противовоздушная операция; боевые действия войск двух воюющих государств и т.д. Эти примеры показывают, что операции могут сильно различаться по масштабу и сложности. Представим стрельбу зенитной управляемой ракетой по воздушной цели как операцию.

Стрельба проводится с определенной целью, например, с целью поражения самолета противника, т.е. его уничтожения или нанесения ему такого ущерба, при котором самолет не в состоянии выполнить свою боевую задачу. Она состоит из упорядоченной совокупности таких взаимосвязанных действий, как подготовка стрельбы (процесс боевой работы подразделения до пуска ракет, направленный на обеспечение наибольшей боевой эффективности ведения огня по воздушной цели в минимально короткие сроки), ведение огня (процесс боевой работы, связанный с наведением ракет с момента пуска до подрыва ракет у цели) и оценивания результатов стрельбы.

В силу естественного разделения труда среди коллектива, участвующего в операции, сама операция представляется совокупностью отдельных действий, работ, процедур и т.п. Поэтому операция может быть представлена как упорядоченная совокупность связанных взаимными отношениями действий, работ, процедур, направленных на достижение единой цели.

Под *работой* понимается совокупность взаимосвязанных действий, направленных на решение задачи. Причем результат решения задачи носит материальный характер, связанный с преобразованием вещества, энергии и т.п. Каждая работа включает в себя вектор результатов работы, вектор ресурсов, необходимых для выполнения работы и время, выделенное на выполнение работы.

Процедура – это совокупность взаимосвязанных действий, направленных на решение задачи, результаты которой носят не материальный, а концептуальный характер (составление отчетности, разработка проектов, планов, решение научных задач и т.п.). Реализация процедуры также требует затрат материальных ресурсов, поэтому процедура характеризуется такой же логикой, как и работа.

Операции расчленяются на ряд частных операций, работ и процедур. Операции большого масштаба могут быть представлены как многоуровневая иерархическая совокупность множества операций меньшего масштаба. Соответственно членению операций на иерархическую совокупность операций меньшего масштаба происходит членение цели (задачи) операции на иерархическую совокупность подцелей (подзадач). Например, боевые операции, проводимые в масштабе фронта, осуществляются в виде совокупности взаимосвязанных армейских операций. В свою очередь, операции, проводимые армиями, являются совокупностью операций дивизий и т.д.

Достижение цели операции осуществляется с помощью комплекса технических средств и обслуживающего персонала, объединенных в единую систему. Применительно к военным операциям совокупности взаимосвязанных технических объектов и личного состава, объединенных для решения военных задач, называют *военно-техническими системами*.

Примером военно-технической системы может служить зенитный ракетный комплекс (ЗРК), рассматриваемый вместе с личным составом подразделения (войск). Зенитный ракетный комплекс представляет собой совокупность функционально связанных зенитных управляемых ракет и наземных устройств, обеспечивающих обнаружение и сопровождение выбранной (выбранных) для обстрела цели (целей), подготовку и наведение ракет на цель (цели). Личный состав подразделения, участвующий в выполнении операции стрельбы по воздушной цели, проводит подготовку стрельбы, ведение огня на уничтожение воздушного противника и оценивание результатов стрельбы. Зенитный ракетный комплекс и личный состав образуют единую организационную систему, выполняющую указанную операцию.

В теории исследования операций совокупность технических устройств и лиц, которые стремятся в данной операции к достижению некоторой цели, называют еще *оперирующей стороной*. В операции могут участвовать одна или несколько оперирующих сторон, преследующих различные, несовпадающие цели. Несовпадение целей оперирующих сторон создает конфликтную ситуацию. Подобные операции называются многосторонними или конфликтными.

Наряду с оперирующими сторонами в операции участвует внешняя среда (совокупность всех внешних факторов, влиявших на исход операций), поведение которой не подчинено стремлению к достижению целей операции. Объекты внешней среды могут оказывать воздействие на ресурсы, систему, участвующую в операции, или результат ее функционирования, однако непосредственно в процессе преобразования ресурсов в результат участия не принимают, т.е. их исключение не нарушает хода данного процесса. К внешней среде относятся системы более высокого уровня по сравнению с рассматриваемой системой и также природа, а для военно-технических систем – еще и противник.

Операция представляется структурной схемой, изображенной на рис. 1.11. Она является управляемым мероприятием. Для придания целесообразности и упорядоченности деятельности организационной системы, предназначенной для выполнения операции, необходим некоторый руководящий центр или орган управления операциями. Орган распоряжается в соответствии со своим замыслом всеми выделенными на операцию ресурсами.

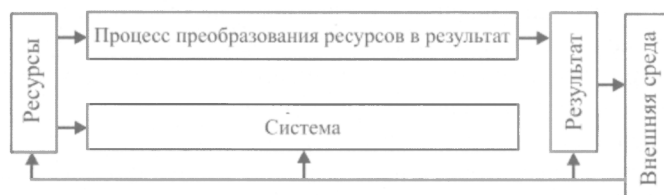


Рис. 1.11. Структурная схема операции

Замысел операции – это предшествующее операции представление о ней руководящего центра (о возможном протекании операции, об альтернативных способах достижения цели и т.п.). Так как управление операцией предполагает не только управление системой, осуществляющей операцию, но и подразумевает рациональное распределение ресурсов, то комплекс «ресурсы – система» целесообразно объединить в единую систему. Этот комплекс называют операционной системой.

Операционная система – это совокупность объектов (как материальных, так и нематериальных – информация, время и т.п.), в результате взаимодействия которых реализуется операция. Отсутствие любого из элементов операционной системы делает осуществление операции невозможным. Управление операционной системой осуществляет орган управления, который в соответствии с единым замыслом реализует в ходе операции установки по организации операции и последующему управлению.

Замысел операции для его реализации разворачивается в план операции.

План операции – зафиксированная каким-либо образом модель предстоящей операции. Эта модель содержит порядок выполнения взаимосвязанных отдельных действий и порядок распределения и ввода ресурсов. В целом порядок действий и распределение ресурсов характеризует способ достижения цели операции или курс действий в предстоящей операции. Очевидно, что существует несколько альтернативных способов достижения цели (несколько курсов действий), а, следовательно, и несколько альтернативных планов проведения операции.

Поскольку операция есть система, компонентами которой являются действия, работы, процедуры и частные операции, то и план как модель операции также называется системой, но системой концептуальной. Компонентами этой системы являются принятые решения по способам достижения цели операции и ее подцелей, а также по распределению ресурсов. План должен быть развернут и во времени, т.е. должны быть указаны моменты начала каждой работы и процедуры. Для разработки плана нужно осуществить операцию, которая носит название планирования. На основании вышеизложенного, план операции можно определить еще следующим образом.

План операции – это фиксация целей, задач и средств, предусматривающих направленное изменение ситуации при данном или предполагаемом состоянии среды. Поскольку операция развертывается во времени и для ее выполнения нужны ресурсы, то плану можно дать также следующие эквивалентные определения.

План операции – это развернутый во времени, сбалансированный по ресурсам, взаимоувязанный по отношению к общей цели перечень элементарных операций различного ранга, направленных на достижение общей цели или на решение поставленной задачи. План операции – это разработанный в органе управления операцией, развернутый во времени и сбалансированный по ресурсам перечень целей и задач для органов управления низких рангов.

Для достижения цели оперирующая сторона должна располагать некоторым запасом активных средств (ресурсов), используя и расходуя которые она может добиваться достижения цели. Оперирующая сторона управляет операцией, выбирая те или иные способы использования ресурсов – способы действий (или иначе – альтернативы, стратегии, управления). Поэтому, рассматривая какую-либо операцию, всегда предполагают, что существует некоторое множество в общем случае неравноценных способов осуществления данной операции и что эти способы можно сравнивать между собой по определенным количественным показателям, которые характеризуют степени приспособленности способов для достижения поставленной цели.

Например, планируя стрельбу отдельной зенитной управляемой ракетой (ЗУР) по воздушной цели, можно попытаться воспользоваться различными имевшимися в распоряжении ЗУР, отличающимися своими лётно-баллистическими и маневренными характеристиками, и применить различные методы наведения. Из всех вариантов наиболее предпочтительным является тот, при котором вероятность поражения цели наибольшая.

При планировании отражения воздушного налета средствами ПВО из всех возможных способов распределения целей по средствам поражения следует выбрать такой, который дает в среднем наибольшее число пораженных целей.

Возможности оперирующей стороны по управлению операцией всегда ограничены, поскольку всегда ограничены рядом естественных причин находящиеся в ее распоряжении ресурсы. Этот факт проявляется в наличии ограничений – дисциплинирующих условий на выбор способов действий оперирующей стороны – стратегий. *Стратегии*, удовлетворяющие наложенным ограничениям, называются возможными или допустимыми (в смысле наложенных ограничений). Например, при стрельбе по воздушной цели ограничивающими факторами могут быть число

готовых к пуску ЗУР, располагаемые перегрузки, обуславливающие реальную маневренность ЗУР и зависящие от прочности ЗУР и т.д.

Реализация той или иной допустимой стратегии обычно приводит к различным исходам операции. Чтобы сравнивать между собой качество различных стратегий, нужно иметь возможность оценивать соответствующие исходы операции. Исход операция оценивается с помощью показателей качества.

Любая операция протекает во времени и имеет конкретную цель, Поэтому операция представляет собой целенаправленный процесс. Если назначением системы является реализация этого процесса, то процесс ее функционирования будет целенаправленным. Таким образом, операция – это целенаправленный процесс функционирования некоторой системы. В общем случае оценка функциональных свойств системы проводится как оценка двух аспектов:

- 1) исхода (результатов) функционирования;
- 2) «алгоритма», обеспечивающего получение результатов.

Качество исхода и «алгоритм», обеспечивающий получение результатов, оценивается по показателям качества. Показатели качества вводятся с учетом конкретных особенностей системы и условий ее функционирования. Из множества свойств, присущих любому процессу для характеристики целенаправленного процесса, существенны так называемые операционные свойства, которые определяют его качество. К основным укрупненным показателям качества операции относят результативность, ресурсоемкость и оперативность целенаправленного процесса. В совокупности эти свойства порождают комплексное свойство целенаправленного процесса – эффективность.

Результативность Э характеризуется способностью операции давать целевой результат, т.е. результат, ради которого проводится операция.

Ресурсоемкость R характеризуется расходом ресурсов всех видов (материально-технических, финансовых, информационных, людских и т.п.), используемых для получения целевого эффекта при проведении операции.

Оперативность O характеризуется расходом времени, потребным для достижения цели операции.

Время в общем случае является одним из видов ресурсов, однако в связи с тем, что операция – это процесс, протекающий во времени, последнее выделяют из состава ресурсов.

Под *ресурсами* понимаются запасы сил и средств, используя которые системы, реализующие операцию, достигают поставленных целей.

При оценивании эффективности ресурсы разделяют на две составные части:

- 1) ресурсы, непосредственно преобразуемые в результат (активные ресурсы);
- 2) ресурсы, используемые на создание системы и поддержание ее в состоянии, пригодном для функционирования (пассивные ресурсы). Пассивные ресурсы, как правило, расходуются до момента начала функционирования системы, а активные – в процессе ее функционирования.

Для военно-технических систем активными являются такие виды ресурсов, как боезапас, боевые подразделения, а пассивными – средства доставки боезапаса, обслужи-

живавшие подразделения, т.е. активные ресурсы – это средства, непосредственно наносящие ущерб противнику, а пассивные ресурсы – обеспечивающие средства.

Как активные, так и пассивные ресурсы, в свою очередь, включают в себя материальные, энергетические, информационные и человеческие ресурсы, т.е. запасы материальных объектов, энергии, информации и людей, имеющихся в распоряжении системы, осуществляющей операцию.

Под *результатом* понимается конечный итог выполнения операции. В зависимости от цели операции результат может иметь различный физический смысл. Так, например, это может быть некоторое конечное состояние, в которое должна быть переведена система, либо изменение внешней среды, например, нанесение некоторого ущерба противнику.

Результат операции по достижению цели при данном числе ресурсов зависит от ряда факторов, определяющих условия выполнения операции, а именно: от выбранного способа проведения операции и от управления самим процессом; от воздействия природных условий и противодействия противника.

Оценка исхода операции учитывает, что операция проводится для достижения определенной цели – исхода операции. Под *исходом операции* понимается ситуация (состояние системы и внешней среды), возникающая на момент ее завершения. Для количественной оценки исхода операции вводится понятие показателя исхода операции (ПИО), вектор $Y_{\text{исх}} = \langle Y_{\text{Э}}, Y_{\text{Р}}, Y_{\text{О}} \rangle$, компоненты которого суть показатели отдельных свойств, отражающие результативность, ресурсоемкость и оперативность операции.

Оценка «алгоритма» функционирования является ведущей при оценке эффективности. Такое утверждение основывается на теоретическом постулате, подтвержденном практикой: наличие хорошего «алгоритма» функционирования системы повышает уверенность в получении требуемых результатов. Требуемые результаты могут быть получены и без хорошего «алгоритма», но вероятность этого невелика. Это положение особенно важно для организационно-технических систем и систем, в которых результаты операции используются в режиме реального времени.

В совокупности результативность, ресурсоемкость и оперативность порождают комплексное свойство – эффективность процесса $Y_{\text{эфф}}$ – степень его приспособленности к достижению цели. Это свойство, присущее только операциям, проявляется при функционировании системы и зависит как от свойств самой системы, так и от внешней среды.

Термин «эффективность» связывается и с системой, и с операцией, и с решением. Образующие при этом понятия считаются эквивалентными. В конечном счете, каждое из них отражает соответствие исхода операции, выполняемой системой для достижения поставленной цели. Обычно нужно иметь в виду, что одна или несколько операций реализуются системой. Для большинства операций процедура оценки эффективности решений носит характер прогнозирования.

Выбор критерия эффективности – центральный, самый ответственный момент исследования системы. Процесс выбора критерия эффективности, как и процесс определения цели, является в значительной мере субъективным, творческим, требующим в каждом отдельном случае индивидуального подхода. Наибольшей

сложностью отличается выбор критерия эффективности решений в операциях, реализуемых иерархическими системами.

Конкретный физический смысл показателей определяется характером и целями операции, а также качеством реализующей ее системы и внешними воздействиями. В отдельных системах в качестве показателей результативности могут рассматриваться показатели ресурсоемкости или оперативности, однако качество системы в целом определяется, подобно показателям исхода операции, их совокупностью $K_{\text{эфф}} = \langle V_{\text{Э}}, V_{\text{Р}}, V_{\text{О}} \rangle$.

Условия проведения операции подразделяют на управляемые и неуправляемые. К *управляемым* условиям относятся условия, находящиеся в распоряжении системы, проводящей операцию, а к *неуправляемым* – условия, не контролируемые системой, а именно, природные условия и противодействие противника. Учитывая наличие неуправляемых условий, процесс функционирования системы, выполняющей операцию, можно представить как процесс взаимодействия ее с другой системой (внешней средой).

Принято различать три типа операций: терминальные, развивающиеся и календарно-развивающиеся.

Терминальные операции завершаются достижением цели за конечный интервал времени, после чего оставшиеся ресурсы могут быть использованы в других операциях.

Развивавшиеся (непрерывные) операции – это операции, в процессе выполнения которых одновременно формируется более высокая, по сравнению с предыдущей, цель, т.е. осуществляется непрерывный процесс достижения и коррекции цели.

Календарно-развивающиеся операции – это операции, в которых цель периодически на каждый год, месяц и т.п. повторяется.

Боевые действия представляют собой пример терминальных операций, Действия, направленные на создание новой техники, пример развивающихся операций. Примером календарно-развивающихся операций служит массовое серийное производство.

Операцию, направленную на сохранение существующей (благоприятной) ситуации, называют *оборонительной*. План такой операции – это система целей и задач, предусматривающая нейтрализацию воздействия среды.

Операция на языке теоретико-множественного описания представляется совокупностью

$$O = \langle R_1, R_2, \Psi_0, \theta, T \rangle, \quad (1.1)$$

где R_1 – ресурсы; R_2 – результат; Ψ_0 – отношение на R_1, R_2 , т.е. $\Psi_0 \subset R_1 \times R_2$ ($R_1 \times R_2$ – прямое произведение множеств $R_1 \times R_2$); θ – условия проведения операции; T – время выполнения (длительность) операции.

Отношение Ψ_0 ставит в соответствие затраченным ресурсам полученный результат, т.е. определяет характер операции. Отношение Ψ_0 может быть функциональным, тогда $R_2 = \Psi_0(R_1)$.

Условия проведения операции θ оказывают влияние на расход ресурсов, результат и время его достижения, а также на вид отношения Ψ_0 , т.е. на сам процесс выполнения операции, поэтому выражение (1.1) может быть записано в виде

$$O = \langle R_1(\theta), R_2(\theta), \Psi_0(\theta), T(\theta) \rangle.$$

Ход выполнения операции описывают некоторой совокупностью фазовых координат $y_i, i = 1, \dots, n$, характеризующих степень достижения результата операции, т.е. результат операции R_2 формально описывается вектором $\mathbf{Y}(t) = (y_1(t), \dots, y_n(t))$, компоненты которого характеризуют отдельные свойства данного результата. В свою очередь, введя характеристики x , свойств ресурсов, последние представляются вектором $\mathbf{X}(t) = (x_1(t), \dots, x_m(t))$.

$$\text{Тогда } O = \langle X(\theta, t), Y(\theta, t), \Psi_0(\theta, t), T(\theta, t) \rangle.$$

Классификация операций по свойствам входящих в него компонентов представлена в виде табл. 1.12.

Таблица 1.12

Классификационные свойства операций	Содержание операций
1	2
По виду ресурсов R_1	Операции с однородными ресурсами: материальными $R_{1М}$; энергетическими $R_{1Э}$; информационными $R_{1И}$; человеческими $R_{1Ч}$; временными $R_{1В}$; операции с неоднородными ресурсами. Виды неоднородных ресурсов представляют собой комбинации однородных ресурсов
По виду результатов R_2	Операции с однородными результатами: материальными $R_{2М}$; энергетическими $R_{2Э}$; информационными $R_{2И}$; человеческими $R_{2Ч}$; временными $R_{2В}$; операции с неоднородными результатами
По виду отношения Ψ_0	Операции преобразования, в которых изменяются вид и свойства ресурсов: производство продукции; добыча сырья; производство энергии; преобразование состояния собственно самой системы, проводящей операцию, например, перемещение системы в пространстве; изменение состояния внешней среды (природы); операции распределения, в которых осуществляется распределение или перераспределение ресурсов между элементами самой системы или внешней среды: распределение ресурсов; управление запасами; операции замены; операции упорядочения; операции координации; операции выбора маршрута; составление расписаний; задачи назначения; непериодические операции, в которых конечный результат достигается путем однократного выполнения отношения Ψ_0 ; периодические операции, в которых конечный результат достигается многократным повторением отношения Ψ_0 ;

Окончание табл. 1.12

1	2
	Непрерывные операции, в которых Ψ_0 – непрерывная функция; дискретные операции, в которых Ψ_0 – дискретная функция; элементарные (простые) операции, в которых отношение Ψ_0 не может быть представлено в виде множества отношений $\{\Psi_{0i}\}$, каждому из которых соответствует свой операционный комплекс; сложные операции, в которых отношение Ψ_0 представлено в виде множества отношений $\{\Psi_{0i}\}$, каждому элементу Ψ_{0i} которого соответствует свой операционный комплекс, т.е. свои $R_{1i}, R_{2i}, \theta_i, T_i$
По виду управляемых условий θ_y	Операции с замкнутым управлением, в которых система непосредственно получает информацию о результатах своего функционирования; операции с разомкнутым управлением, в которых информацию о результатах проведения операции система получает только от вышестоящей системы
По виду неуправляемых условий θ_n	Операции с пассивным противодействием, на ход протекания которых влияют только нецеленаправленные воздействия, например природные; операции с активным противодействием, на ход протекания которых влияют целенаправленные (активные) воздействия. Эти операции можно разделить на два класса: 1) неантагонистические, когда воздействия со стороны внешней среды не преследуют цели, противоположной цели операции; 2) антагонистические, когда воздействия со стороны внешней среды преследуют цель, противоположную цели операции

Приведенная классификация является идеализированной. Так как на практике используются ресурсы различных видов, любая операция включает в себя и этап распределения ресурсов, и этап их преобразования и т.д. Однако во многих случаях признак, по которому определяется класс операции, является наиболее существенным, что позволяет пренебрегать по сравнению с ним менее существенными признаками и рассматривать указанные выше классы операций.

1.5.2. Качество результатов функционирования системы и операций

Задача о том, какая система или способ ее применения являются лучшими, решается на основе понятий качества и эффективности. Важность этой задачи обусловила появление специальных теорий, направленных на изучение качества и эффективности. К таким теориям относятся теория качества (квалиметрия) и теория эффективности.

Квалиметрия и теория эффективности имеют один и тот же объект исследования – системы, но предметы исследования их существенно различны. Если квалиметрия изучает основные закономерности оценивания свойств системы, то теория эффективности изучает основные закономерности процессов применения сложных систем в различных операциях, а именно, закономерности и условия приспособленности систем к достижению целей операций, в которых эти системы применяются.

Одним из основных понятий, используемых как квалиметрией, так и теорией эффективности, является понятие качества. В общем случае понятие качества относится к любому объекту или процессу. Так, можно говорить о качестве продукции, качестве операции, качестве системы, участвующей в операции, качестве процесса функционирования системы, качестве ресурсов или результата и т.д. Так как понятия качества системы; качества результата функционирования системы и качества операции отнесены к различным объектам, то и содержание этого понятия будет в каждом из данных случаев различно. Различны будут составы свойств этих объектов и их число, а также показатели, характеризующие данные свойства.

Качество объекта или процесса должно определяться как объективное свойство данного объекта (процесса), обусловленное только особенностями его строения (составом элементов и организацией их в единое целое). Поэтому под *качеством системы* понимается только качество ее строения. Это означает, что свойства системы должны зависеть только от свойств элементов, составляющих систему, и их организации в единое целое, т.е. от особенностей структуры системы и программы ее функционирования. *Качество поведения системы* – категория более высокого уровня, так как оно обуславливается не только качеством системы, но и условиями, в которых она функционирует. Таким образом, качество системы – это свойство или совокупность свойств системы, обуславливающих ее пригодность для использования по назначению. В зависимости от назначения системы совокупность ее свойств, учитываемых при исследовании качества, может быть различна.

Назначение результата функционирования данной системы и, следовательно, перечень его существенных свойств и требования к нему определяются вышестоящей системой, в интересах которой получают этот результат. Так, например, если результатом функционирования системы являются некоторые данные, содержащие информацию об интересующем нас явлении или объекте, то к числу существенных свойств, характеризующих этот результат, можно отнести: объем (число) данных, информативность, точность, достоверность, запаздывание и т.д.

Качество результата функционирования системы – свойство или совокупность свойств результата, обуславливающих его пригодность для использования по назначению. Качество результата функционирования системы предопределяется свойствами, которые могут существенно отличаться от свойств, обуславливающих качество системы.

Операция является целенаправленным процессом функционирования системы, проводящей операцию. Следовательно, в отличие от качества системы или качества результата функционирования системы качество операции обуславливается свойствами, характерными для процессов и, очевидно, отличных от свойств, присущих системе или результату ее функционирования. Действительно, в ходе операции на достижение ее цели расходуются ресурсы, не входящие в систему, участвующую в операции. Приспособленность операции наилучшим образом преобразовывать расходуемые ресурсы в выходные эффекты является ее основным и присущим только ей свойством.

При анализе свойств операции необходимо учитывать, что являясь процессом, операция обладает всеми свойствами, характерными для любых процессов, к числу

которых можно отнести, например, такие свойства, как сложность, непрерывность, периодичность, стационарность, стохастичность, детерминированность и т.д. Кроме того, наличие у операции, как процесса, специфического свойства целенаправленности приводит к появлению у нее ряда новых свойств. К их числу следует отнести: длительность, точность, помехоустойчивость, оперативность, планомерность, масштабность, результативность, ресурсоемкость и т.д.

Кроме перечисленных выше простых свойств, операция обладает и рядом сложных свойств, среди которых важнейшими являются экономичность и эффективность. Экономичность – это свойство, характеризующее рациональность использования ресурсов в процессе преобразования их в результат. Эффективность – свойство, характеризующее приспособленность процесса к достижению цели операции. Данные свойства являются производными от ряда простых свойств операции. Так, экономичность определяется результативностью и ресурсоемкостью, а эффективность – результативностью, ресурсоемкостью и оперативностью.

Под *качеством операции* понимают свойство или совокупность свойств операции, обуславливающие ее пригодность для использования по назначению.

Применительно к целенаправленным процессам, какими являются операции, свойства, обуславливающие их пригодность для использования по назначению, называют операционными.

Взаимосвязь понятий качества системы, качества результата функционирования системы и качества операции определяется тем, что результат операции достигается в процессе функционирования системы. Эта взаимосвязь имеет следующий характер.

Качество результата определяется тем, насколько хорошо организована и проведена операция, т.е. ее качеством. Очевидно, что трудно ожидать достижения результата с высоким качеством, когда операция имеет низкие показатели таких свойств, как точность, помехоустойчивость, результативность и т.д. В свою очередь, при одинаковых управляемых и неуправляемых условиях операции и одинаковых ресурсах высокое качество операции может быть достигнуто только при соответствующем уровне качества системы. Так, требуемые уровни показателей длительности операции, ее помехоустойчивости, точности и результативности могут быть получены при условии, что система обладает высокими показателями быстроты действия, производительности, надежности, живучести и т.д.

Таким образом, качество результата функционирования системы определяется качеством процесса ее функционирования, а последнее, в свою очередь, – качеством системы, осуществляющей данный процесс. Не следует смешивать понятия «качество системы» и «качество целенаправленного процесса функционирования системы», так как эти понятия относятся к существенно различным объектам исследования.

Среди свойств, обуславливающих качество операции, наиболее общим свойством является ее эффективность, так как данное свойство зависит практически от всех факторов, влиявших на процесс проведения операции. Эта особенность эффективности и позволяет использовать показатель эффективности в качестве основного показателя, характеризующего успешность проведения операции.

1.5.3. Эффект и эффективность операции

Хотя конкретные операции достаточно многообразны, существует ряд общих принципиальных положений, которыми необходимо руководствоваться при формировании системы критериев эффективности решений. Раскроем смысловое (семантическое) значение эффективности – комплексного свойства операции как целенаправленного процесса. Термин «эффективность» происходит от понятия «эффект».

Эффект – это результат некоторого действия. Отсюда эффективный – это дающий эффект, приводящий к нужным результатам, результативный, действенный. Таким образом, эффективность – свойство действия (операции) давать эффект. В общем случае эффект есть результат деятельности безотносительно к тому, какими усилиями он достигается.

Система, осуществляя операцию (или целенаправленно функционируя), определяет состояние среды или свое собственное состояние. Совокупность состояний системы и среды в один и тот же момент времени называют *ситуацией*. При выполнении системой операции происходит изменение ситуации. Это изменение, состоящее в целенаправленном преобразовании свойств среды или системы, предусмотрено целью операции и обусловлено именно операцией (целенаправленным процессом функционирования системы).

По отношению к цели рассматриваемого действия в общем случае эффект качественно может быть как положительным, так и отрицательным, однако при оценивании качества результатов операции речь идет всегда о положительном (по смыслу, а не к величине) эффекте, имеющем определенную полезность. Полезный эффект любой операции проявляет себя через изменение таких свойств, преобразование которых предусмотрено целью операции. Например, полезный эффект обстрела некоторого объекта проявляется в изменении его состояния в результате обстрела. Здесь: операция – обстрел объекта, система – батарея орудий, среда – объект поражения, цель операции – поражение объекта, т.е. такое изменение соответствующих свойств объекта (состояния объекта), при котором объект считается пораженным (неспособным выполнять свои функции). Сказанное позволяет дать следующее определение полезного эффекта операции.

Полезный эффект операции – это совокупность целенаправленных изменений свойств (состояния) определенных объектов среды или системы, обусловленных осуществляемой операцией.

Пусть $\mathbf{U}(t) = (U_1(t), \dots, U_\mu(t))$ – вектор, характеризующий состояние системы на некоторый момент времени t осуществления операции; $\mathbf{V}(t) = (V_1(t), \dots, V_\nu(t))$ – вектор, характеризующий состояние среды на этот же момент времени. Тогда ситуация на момент времени t осуществления операции будет характеризоваться совокупностью $\mathbf{S}(t) = (\mathbf{U}(t), \dots, \mathbf{V}(t))$.

Ситуация, сложившаяся на момент времени T завершения операции $\mathbf{S}(T) = (\mathbf{U}(T), \dots, \mathbf{V}(T))$, будет представлять собой исход операции. В этом случае полезный эффект последней можно определить как часть исхода операции, включающую в себя компоненты векторов $\mathbf{U}(T), \mathbf{V}(T)$ характеризующие состояние

только тех объектов среды или системы, для которых целью операции предусматриваются целенаправленные изменения их состояния (свойств). В связи с этим полезный эффект можно характеризовать вектором $Y(t) = (y_1, \dots, y_n)$, компоненты которого y_i являются соответствующими компонентами векторов $U(T), V(T)$.

Характер целенаправленного изменения свойств может быть различным. В некоторых операциях полезный эффект состоит в скачкообразных изменениях соответствующих свойств среды или системы, в результате которых после окончания операции объекты среды или системы переходят в новое состояние скачкообразно. Для таких операций можно говорить о качественном характере полезного эффекта или просто о качественном полезном эффекте, который проявляется в форме наступления определенного события или явления. Например, операция-обнаружение воздушной цели, военно-техническая система – РЛС обнаружения, объект среды, состояние которого целенаправленно изменяется при осуществлении операции, «цель», подлежащая обнаружению. Очевидно, что после осуществления операции цель может находиться в двух состояниях: обнаружена и не обнаружена, т.е. имеет место скачкообразное изменение состояния цели в результате осуществления операции.

Другие операции характерны тем, что для них полезный эффект состоит в изменении уровня некоторых свойств определенных объектов среды или системы. Этот уровень может быть измерен, выражен количественно. Для таких операций можно говорить о количественном полезном эффекте, который проявляется в форме вещества, энергии, информации, а также в виде совокупности некоторых однородных событий. Например, операция – стрельба по группе разрешаемых воздушных целей, военно-техническая система – ЗРК, объект среды, состояние которого целенаправленно изменяется при осуществлении операции, – группа целей. В ходе проведения этой операции состояние группы целей будет изменяться и это изменение можно характеризовать числом пораженных целей в каждый момент осуществления операции.

Полезный эффект называется *статическим* или *финитным эффектом*, если он проявляется только после осуществления операции. В отличие от него полезный эффект, проявляющийся в ходе самой операции, называется *динамическим* полезным эффектом. Финишный эффект носит, как правило, качественный характер, а динамический – количественный характер. Различают функциональный полезный эффект и экономический полезный эффект. Функциональный полезный эффект непосредственно проявляется через изменение состояния объектов среды или системы. Экономический полезный эффект, проявляется косвенно в опосредованном виде, т.е. постольку, поскольку имеет место функциональный эффект; он всегда выражается в экономических категориях.

Функциональный полезный эффект – это прямой эффект, получаемый при выполнении системой своих прямых функций, а экономический эффект – это косвенный, побочный, эффект, выражающийся в затратах, прибылях, предотвращенных потерях и т.п. Например, при стрельбе зенитной управляемой ракетой по самолету-бомбардировщику противника функциональным полезным эффектом (прямым эффектом) будет поражение самолета, а экономическим эффектом (косвен-

ным побочным эффектом) – предотвращенный от бомбового удара ущерба промышленному центру.

Следует иметь в виду, что понятия «прямой» и «косвенный» эффекты относительны и применимы лишь к конкретным операциям. Например, существуют операции, основной целью которых является экономический эффект, а понятие «функциональный эффект» (если это не чисто финансовая операция) либо учитывается косвенно, либо не учитывается вообще.

Важной, с практической точки зрения, является классификация полезного эффекта по признаку, связанному с двойственной сущностью понятия системы. С одной стороны, данная система – это самостоятельная в определенном смысле система, а с другой стороны – подсистема в системе более высокого уровня иерархий (суперсистеме). Поэтому полезный эффект операции, осуществляемой этой системой, может проявляться через изменение состояния определяющих объектов системы или среды, с которыми взаимодействует данная система в проведении операции. Этот полезный эффект называют *внешним, частным, или внутренним* полезным эффектом.

Полезный эффект операции, осуществляемой заданной системой, может проявляться также через изменение полезного эффекта операции, осуществляемой суперсистемой. Такой полезный эффект называется *несобственным* или *внешним* полезным эффектом. Как правило, несобственный эффект рассматривают для операций (и соответствующих им систем), носящих обеспечивающий характер по отношению к операции более высокого уровня иерархии (соответствующей суперсистеме).

К понятию «эффект» близко примыкает понятие «эффективность». Если размер полученного эффекта поставлен в соответствие с затратами ресурсов на его достижение, то говорят об эффективности произведенных действий. Поэтому эффективность – это не просто свойство операции, проявляющееся в ее способности давать эффект, а именно действенность такой способности, т.е. результативность, соотношенная с затратами ресурсов всех видов. Следовательно, понятие эффективности должно предусматривать совместный анализ эффекта и затрат на его достижение.

Под затратами на осуществление операции понимают совокупность всех ресурсов, расходуемых на достижение цели операции. Часть этих ресурсов непосредственно расходуется в ходе осуществления операции. Такие ресурсы называют активными или операционными.

Операционные ресурсы – это те ресурсы, которые поступают в систему извне для достижения цели операции и которые система перерабатывает или расходует в процессе своего целенаправленного функционирования. Операционные ресурсы можно подразделить на прямые и косвенные. Прямые операционные ресурсы непосредственно связаны с получением полезного эффекта в операции. Одним из основных прямых операционных ресурсов является время, отводимое на осуществление операции. Косвенные операционные ресурсы связаны с полезным эффектом в опосредованном виде, т.е. через их преобразование и расходование в различных мероприятиях, обеспечивающих данную операцию.

Другая часть ресурсов, входящих в затраты на осуществление операции, может быть названа капитальными или пассивными ресурсами. Капитальные ресурсы – это те ресурсы, которые воплощены в саму систему, в ее элементы. Это ресурсы

самой системы, они обеспечивают ее дееспособность. Как правило, расход этих ресурсов учитывается в виде их доли, приходящейся на данную операцию.

Пусть, например, военно-технической системой является боевой самолет. Капитальными ресурсами в этом случае будут: самолет со всем оборудованием; вооружение, установленное на самолете; технические системы и средства, обеспечивающие боевое применение самолета (операцию), и, наконец, экипаж. К операционным ресурсам относятся: прямые ресурсы – бомбы, снаряды и другое оружие, а также время; косвенные ресурсы – топливо, ЗИП, средства спасения экипажа, денежное и вещевое довольствие экипажа, физиологические и психологические ресурсы экипажа. Одни и те же ресурсы в разных операциях могут играть различную роль. Например, если самолет пассажирский и, следовательно, имеет место иная, чем применение по назначению боевого самолета, операция, то топливо будет прямым операционным ресурсом.

Эффективность – это объективное комплексное свойство целенаправленного процесса функционирования системы, характеризующее его приспособленность к достижению цели, реализуемой системой операции (к решению стоящих перед системой задач в соответствии со своим прямым целевым назначением). Эффективность – одно из свойств операции (а не системы, выполняющей операцию), имеющую количественную меру, учитывающую совместный полезный эффект операции и затраты на ее достижение.

Мера эффективности является внешней по отношению к системе, выполняющей операцию, т.е. только одно описание этой системы не может быть достаточным для введения этой меры.

Оценка эффективности учитывает определенные свойства системы более высокого уровня и, следовательно, касается как исследуемой системы, так и системы, в которую входит изучаемая система; нецеленаправленные процессы функционирования системы эффективности не имеют.

Имеется несколько разновидностей понятия «эффективность»: целевая (функциональная) эффективность, экономическая эффективность, социальная эффективность и т.д.

Эффективность есть комплексное свойство, аккумулирующее в себе информацию и о получаемых результатах и о затратах ресурсов. Строго говоря, эффективность операции одна, и приведенные выше термины относятся к отдельным ее эффектам. Так, функциональная эффективность целенаправленного процесса функционирования системы характеризуется прямым эффектом (целевым эффектом), получаемым при выполнении системой своих прямых функций, экономическая эффективность – экономическим (т.е. косвенным, побочным) эффектом, выражающимся в затратах, прибылях, предотвращенных потерях и т.п.

В соответствии с требованиями комплексного исследования эффективности ее оценивание должно проводиться с учетом всех существенных эффектов операции. Поэтому за множеством различных эффективностей, как правило, скрывается некомплексный подход, при котором изолированно рассматриваются отдельные эффекты операции.

В практических задачах в зависимости от характера получаемого результата эффект измеряется натуральными или стоимостными показателями. Поэтому в теории эффективности понятие эффективности часто связывают с понятиями или целевой, или экономической эффективности.

Целевая эффективность характеризуется величиной получаемого прямого натурального эффекта, соотнесенного с затраченными на его получение ресурсами (материальными, временными, денежными, людскими и т.д.). Показатель целевой эффективности определяет степень приспособленности системы к выполнению стоящей перед ней задачи. Любая разновидность показателя целевой эффективности предполагает соизмерение результата с «ценой» его достижения. Если, например, рассматривается поражение цели ракетами, то эффективность характеризуют таким показателем, как вероятность поражения цели n ракетами. Сама по себе вероятность (например, $p = 0,9$) характеризует достигаемый результат. Вероятность поражения цели определенным числом ракет, например, тремя ракетами ($n > 3$), характеризует целевую эффективность, так как в последнем случае показатель $P > 0,9$ отражает как достигнутый эффект, так и затраченные на это ресурсы.

Экономическая эффективность характеризуется величиной получаемого экономического результата деятельности, соотнесенного с затратами ресурсов, необходимых для обеспечения деятельности. Примерами показателей экономической эффективности могут быть выработка, трудоемкость, фондоотдача и т.д. Они характеризуют величину полученного результата, приходящегося на единицу затраченного ресурса (например, выработка), либо затраты ресурса на единицу получаемого результата (например, трудоемкость, фондоотдача).

Эффективность является наиболее общим свойством операции. Поскольку эффективность – это свойство действия, то его некорректно приписывать только системе, реализующей операцию. Основанием для такого утверждения являются следующие причины:

оценивание эффективности связано не столько со свойствами системы, сколько со свойствами результата ее функционирования и ресурсов, затрачиваемых на достижение данного результата, т.е. с оцениванием объектов, не включаемых в систему;

эффективность функционирования системы определяется не только свойствами системы, но и способом и условиями ее применения и, следовательно, оценку эффективности неправомерно относить только к системе;

рассмотрение эффективности как свойства системы вступает в противоречие с понятием качества системы,

Поэтому понятие эффективности правильнее относить только к операции, выполняемой системой, и применяемый в ряде случаев термин «эффективность системы» следует понимать как термин, обозначающий свойство целенаправленного процесса функционирования системы. Если и можно использовать этот термин применительно к системе, то только лишь в смысле характеристики потенциальных возможностей системы, определяемых ее качеством.

Эффективность является лишь только одним из свойств операции, хотя и наиболее общим. Поэтому понятие качества операции шире понятия эффективности

операции. В свою очередь, понятие качества системы уже понятия эффективности функционирования (применения) системы в том смысле, что эффективность функционирования системы зависит от качества последней, но не наоборот. Основные факторы, влияющие на эффективность операции, приведены в классификационной схеме, изображенной на рис. 1.12.

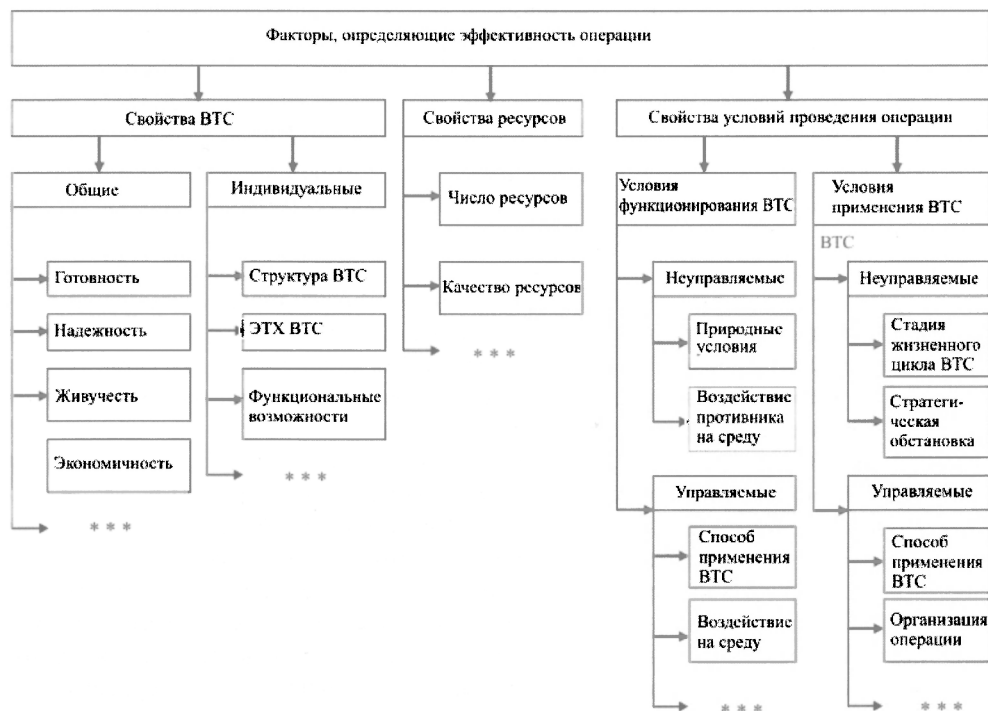


Рис. 1.12. Классификация основных факторов, влияющих на эффективность операции

Основной проблемой оценки эффективности вероятностных операций является неясность способа определения требуемых вероятностей. Это связано с отсутствием достаточной статистики. Применение методов классической теории вероятности допустимо при повторяемости опытов и одинаковости условий. Эти требования в сложных системах выполняются не всегда. Наибольшие трудности возникают при оценке эффективности систем в условиях неопределенности. Для решения этой задачи разработано несколько подходов. Порядок оценки эффективности систем в неопределенных операциях составляет один из разделов теории принятия решений.

Выбор показателей для конкретной системы связан с анализом большого объема плохо структурированной информации и поэтому в системном анализе сформулированы требования, следование которым позволяет обосновать применимость показателей к оценке систем.

1.5.4. Показатели и критерии качества и эффективности операции

Для оценивания качества целенаправленных процессов функционирования различных систем и сравнения их между собой используют показатели и критерии качества и эффективности. Например, эффективность стрельбы одиночной зенитной управляемой ракетой по воздушной цели оценивают с помощью такого показателя эффективности операции, как вероятность P_i поражения цели одной ракетой. Критерием пригодности этой операции будет условие

$$P_i > P_{\text{тр}},$$

где $P_{\text{тр}}$ – принципиально допустимое значение вероятности, необходимое для того, чтобы операция более крупного масштаба, для которой данная операция является обеспечивающей, при прочих нормальных условиях оказалась достаточно эффективной.

Так как эффективность – это комплексное операционное свойство целенаправленного процесса функционирования системы, а выполнявшаяся операция отличается от всех других процессов наличием цели, то мера (показатель) эффективности должна характеризовать степень достижения цели операции. Поэтому для правильного выбора показателя эффективности необходимо четкое формулирование цели операции.

К правильному выводу при исследовании данной операции можно прийти лишь после выбора показателя, отвечающего главной цели функционирования системы. Содержательно цель операции может определяться по-разному, однако во всех случаях она заключается в получении требуемых результатов.

Физически достижение цели операции – это наступление некоторого события, формально – это выполнение необходимых условий, при соблюдении которых цель операции может считаться достигнутой. Следует помнить, что здесь рассматриваются не условия функционирования или применения системы, осуществляющей операцию, а условия выполнения системой своей задачи (условия достижения цели операции). Уместно заметить, что сходные между собой понятия «цель операции» и «задача систем» в общем случае отождествлять полностью нельзя. Если цель операции достигнута, это значит, что система свою задачу выполнила. В то же время возможна ситуация, когда своя задача системой выполнена, а цель операции не достигнута. Близки друг к другу по содержанию также понятия «назначение» и «цель применения». Однако между ними есть вполне определенное различие.

Понятие «назначение» баллов непосредственно характеризует использование технического изделия, тогда как понятие «цель применения» описывает конечный эффект использования.

При выборе показателей эффективности наряду с требованием их согласованности с целями операций руководствуются рядом и других требований, которые в общем случае не всегда могут быть одновременно выполнены из-за возникающей противоречивости. Эти требования сводятся к следующему.

Показатель эффективности должен объективно отражать степень соответствия операции своему назначению и достаточно полно характеризовать ее как единый целенаправленный процесс. Он должен учитывать множество существенных

свойств операции и отражать не только общие, но и присущие ей частные стороны. Особо необходимо выделять целевой аспект показателя эффективности, его ориентацию на конечный результат применения системы, выполнявшей операцию. Промежуточные итоги хотя и важны, но они не должны быть определяющими. Показатель должен быть представительным, т.е. позволять оценивать эффективность решения основной задачи системы, а не второстепенных ее задач.

Общими требованиями к показателям исхода операции являются:

соответствие показателя оценки цели операции, с полнотой объема содержащейся в них информации;

правильным учетом основного назначения системы и стохастичности условий ее функционирования;

измеримость и реализуемость (вычислимость);

однозначность количественного выражения эффективности;

устойчивость;

чувствительность (критичность) к управлявшим и определяющим их значения факторам;

эффективностью в статистическом смысле, т.е. быстрой сходимостью оценок показателей к их истинным значениям при увеличении объема используемых для получения оценок этих значений статистических данных;

простота использования и определения без больших затрат средств и времени;

наглядность и ясный физический смысл;

конструктивность;

необходимая гибкость, универсальность и чувствительность;

неизбыточность.

Значения каждого показателя эффективности определяются множеством факторов.

Как числовая характеристика показатель эффективности должен являться функцией этих факторов. Основные факторы, влияющие на эффективность операции, принято делить на две группы факторов.

Первая группа включает в себя параметры системы и реализуемой ею операции, а вторая – учитывает условия проведения операции», т.е. условия функционирования системы (температура, влажность, давление, радиация и т.п.) и условия ее применения (ситуационные и организационно-технические условия: способ применения системы, действия противника и т.п.). Чем больше факторов входит в показатель, тем он полнее. Однако при выборе функциональной связи показателя эффективности с параметрами операции и факторами, учитывающими условия ее проведения, необходимо учитывать неодинаковую значимость отдельных свойств системы и условий проведения операции.

Показатель эффективности зависит от структуры системы, значений ее параметров, характера взаимодействия с внешней средой. Он определяется целенаправленным процессом функционирования системы, т.е. является функционалом от этого процесса.

Если полезный эффект применения системы проявляется в форме наступления некоторого случайного события, то в качестве показателя эффективности ис-

пользуется вероятностью этого события, т.е. вероятность выполнения поставленной задачи. Если же результат применения системы описывается случайной величиной, то в качестве показателя эффективности используется математическое ожидание возможного результата или какая-то другая числовая характеристика этой величины. Если цель применения системы – достижение результата не менее некоторой вполне определенной величины, то в качестве показателя эффективности выбирают вероятность достижения не менее заданного результата.

Показатель эффективности операций – это комплексный показатель качества целенаправленного процесса функционирования системы, осуществлявшей операцию, а критерий оценивания качества результатов этого процесса и его эффективности есть математические формулировки цели операции и требуемой степени ее достижения. Поэтому необходимо четко разграничивать такие основные понятия теории эффективности, как: «эффективность» – комплексное свойство операции, складывавшееся из ее отдельных существенных операционных свойств (результативности, ресурсоемкости, оперативности); «показатель эффективности» – количественная мера этого свойства; «критерий эффективности» – совокупность условий, определявших цели операции и в соответствии с ними пригодность, оптимальность или превосходство исследуемой операции (целенаправленной системы действий).

Из множества свойств, присущих любому процессу, для характеристики операции как целенаправленного процесса существенны операционные свойства, определяющие ее качество. Большинство этих свойств характеризуются результатами операции, т.е. даваемыми ею эффектами. Последние, однако, слабо связаны с целями операций и поэтому являются косвенными характеристиками ее качества. Прямыми характеристиками будут такие показатели, которые позволяют непосредственно ответить на вопрос: в какой мере (вероятностной) будет достигнута цель операции.

Показатели, используемые для оценивания качества операции, делят на два класса:

- 1) показатели результатов (эффектов) операции (показатели результативности целенаправленного процесса функционирования системы);
- 2) показатели эффективности операции, отражающие уровень достижения ее цели.

В соответствии с этим различают два уровня оценивания качества операции:

- 1) оценивание качества результатов операции;
- 2) оценивание качества самой операции, называемого ее эффективностью.

Из этих двух уровней последний является доминирующим (главным), поскольку операция может считаться качественной тогда и только тогда, когда требуемыми качествами обладают все без исключения ее результаты.

Собственно результатом операции является получаемый целевой эффект (ее основной эффект). Однако с формальной точки зрения соответствующий этому эффекту расход ресурсов также следует рассматривать как результат операции (или как ее побочный эффект). Таким образом, свойства системы и результаты операции, определяющие их качество, целесообразно разделить на две группы:

- 1) целевые (функциональные);
- 2) обеспечивающие (эксплуатационно-технические).

Эта классификация в какой-то мере условна, поскольку целью одной операции может быть обеспечение проведения другой операции более крупного масштаба (супероперации).

Пусть, например, цель операции – нанесение плацдарму противника определенного ущерба. Тогда очевидно, что показателем целевого свойства результатов операции будет численная мера наносимого ущерба (абсолютного или относительного). В качестве обеспечивавших могут выступать такие свойства системы и операции, как готовность, надежность, живучесть, мобильность, быстродействие, точность, оперативность (своевременность) и т.п. При этом для подсистем системы, обеспечивавших поддержание этих свойств на заданном уровне, последние будут целевыми.

Если теперь перейти к рассмотрению операции более крупного масштаба (более высокого уровня), необходимым (но не достаточным) условием достижения цели, которой является нанесение плацдарму ущерба не менее требуемого, то свойство первой операции – способность наносить ущерб плацдармам противника – станет обеспечивающим. При этом цели системы, выполняющей задачу, поставленную перед ней суперсистемой, оказываются подчиненными целям последней.

В ходе операции на достижение ее цели расходуются ресурсы и время. Поэтому качество операции не может быть полно охарактеризовано ни одним из ее операционных свойств в отдельности. Для комплексного (многокомпонентного) исследования эффективности операции показатель качества ее результатов должен включать в себя три группы компонентов, характеризующих соответственно возможные целевые эффекты (результативность операции), затраты ресурсов (ресурсоемкость операции) и затраты времени (оперативность операции).

Пусть E – векторный показатель качества результатов операции; $\mathcal{E} = (\mathcal{E}_1, \dots, \mathcal{E}_{n_1})$ – вектор результатов (целевых, позитивных эффектов) операции; $C = (C_1, \dots, C_{n_2})$ – вектор затрат ресурсов (побочных, негативных эффектов) на получение этих результатов; $\tau = (\tau_1, \dots, \tau_{n_3})$ – вектор временных затрат (побочных, негативных эффектов) на достижение целевых эффектов. Тогда показатель качества результатов операции может быть представлен как n -мерный вектор

$$E = (\mathcal{E}, C, \tau) = (\mathcal{E}_1, \dots, \mathcal{E}_{n_1}, C_1, \dots, C_{n_2}, \tau_1, \dots, \tau_{n_3}).$$

Путем свертывания показателей частных эффектов внутри групп n -мерный вектор частных показателей результатов (аффектов) операции может быть сведен к трехкомпонентному вектору. Например, это может быть сделано путем введения обобщенных показателей:

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^{n_1} d_i \mathcal{E}_i; \quad C = \sum_{j=1}^{n_2} \beta_j C_j; \quad \tau = \max \{\tau_1, \dots, \tau_{n_3}\},$$

где d_i и β_j – весовые коэффициенты.

В последнем случае показатель качества результатов операции принимает вид $E = (\mathcal{E}, C, \tau)$. Применяя свертывание частных показателей, необходимо учитывать, что оно корректно лишь внутри групп.

При строгом толковании смысла показателя E его компоненты следует рассматривать как количественные характеристики лишь результатов операции. Например, при стрельбе по группе воздушных целей результат может быть представлен числом уничтоженных целей. Однако это число в общем случае не говорит о качестве результата, ибо среди уничтоженных целей в одном и том же количестве может быть разное число опасных целей – носителей средств поражения. Поэтому показатель результатов операции E можно считать показателем качества этих результатов, если заранее известна однозначная связь между количественными характеристиками результатов и их качеством. Как показывает приведенный пример, это не всегда имеет место. В дальнейшем будем полагать, что однозначная взаимосвязь между количеством результата и его качеством имеется. Тогда трактовка показателя E как показателя качества результатов операции будет правомерной.

Итак, при выполнении операции достигается комплекс эффектов (основных, целевых $\mathcal{E}$ и побочных $\mathcal{C}, \tau$), показателем которого является трехкомпонентный вектор $\mathbf{E} = (\mathcal{E}, \mathcal{C}, \tau)$. Представление показателя качества результата операции в виде вектора $(\mathcal{E}, \mathcal{C}, \tau)$ называют каноническим.

Критерий пригодности операции для использования по назначению, оценивающий ее качество, записывается следующим образом:

$$E \in \{E_d\},$$

где $\mathbf{E}_d = (\mathcal{E}_d, \mathcal{C}_d, \tau_d)$ – вектор допустимых результатов операции, при которых обеспечивается достижение ее цели; $\{E_d\}$ – область допустимых значений вектора $\mathbf{E}$.

Достижение цели операции формально означает выполнение условия (1.2).

В общем случае результат операции зависит от эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ) системы, выполняющей операцию, и факторов, характеризующих условия функционирования системы, т.е. $(\mathbf{E} = \mathbf{E}(\mathbf{a}, \mathbf{b}'))$, где $\mathbf{a}$ – вектор ЭТХ системы; $\mathbf{b}'$ – вектор факторов, характеризующих условия функционирования системы.

Допустимые значения $\mathbf{E}_d$ вектора $\mathbf{E}$ определяются условиями применения системы, т.е. $\mathbf{E}_d = \mathbf{E}_d(\mathbf{b}'')$, где $\mathbf{b}''$ – вектор факторов, характеризующих условия применения системы.

Условия функционирования и применения системы в совокупности образуют условия проведения операции; описываемые вектором $\mathbf{b} = \mathbf{b}' \cup \mathbf{b}''$. Некоторые компоненты у векторов $\mathbf{b}'$ и $\mathbf{b}''$ могут быть одинаковыми. Поэтому размерность вектора $\mathbf{b}$ условий проведения операции может быть меньше суммы размерностей векторов $\mathbf{b}'$ и $\mathbf{b}''$.

В общем случае векторы $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и $\mathbf{b}'$ имеют случайные и детерминированные компоненты. Наличие случайных компонентов является типичной ситуацией для сложных систем, поскольку на их ЭТХ и параметры, а также на условия функционирования и применения воздействует целый ряд случайных факторов. Случайность отдельных или всех компонентов векторов $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и $\mathbf{b}'$ обуславливает случайность и вектора $\mathbf{E}$ результатов операции, и области $\{E_d\}$ его допустимых значений. Следовательно, выполнение условия $\mathbf{E} \in \{E_d\}$, означающего достижение цели операции, есть случайное событие, по которому судить об эффективности операции

нельзя. Показатель эффективности должен характеризовать эффективность операции, а не отдельной ее реализации. Поэтому в качестве показателя эффективности операции должна фигурировать вероятность события $E \in \{E_d\}$ – вероятность достижения цели операции

$$P_{д.ц} = P(E \in \{E_d\}).$$

Вероятность $P_{д.ц}$ характеризует степень соответствия результатов операции E (ее целевого и побочных эффектов) предъявленным к ним требованиям $\{E_d\}$, т.е. целям операции, исчерпывающим образом. Эта вероятность является наиболее информативным комплексным показателем эффективности операции, поскольку она не только характеризует операцию с учетом соотношения основного целевого (полезного) и побочных (негативных) эффектов, но и устанавливает степень (уровень) достижения цели операции.

Вероятность достижения цели операции зависит от векторов $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$, т.е.

$$P_{д.ц} = P_{д.ц}(\mathbf{a}, \mathbf{b}).$$

Для ее вычисления необходимо и достаточно знать законы распределения случайного вектора $\mathbf{E}$ и случайной области $\{E_d\}$.

Использование вероятности достижения цели операции в качестве меры ее эффективности порой связано с определенными трудностями, вызванными в основном отсутствием информации о законах распределения вектора $\mathbf{E}$ и области $\{E_d\}$. Поэтому иногда в качестве показателей эффективности вместо вероятности $P_{д.ц}$ используют числовые характеристики случайного вектора $\mathbf{E}$, причем наиболее распространенной характеристикой является математическое ожидание этого вектора.

Оценивание эффективности операции реализуется в два этапа.

На первом этапе определяется показатель качества результатов операции – вектор $\mathbf{E}$ показателей Δ, C, τ ее частных результатов (эффектов) j ; определяются требования к качеству результатов операции – область $\{E_d\}$ допустимых значений Δ_g, C_g, τ_g показателей Δ, C, τ ее результатов. Одновременно формулируется критерий оценивания качества результатов $E \in \{E_d\}$.

На втором этапе вычисляется значение показателя эффективности операции – вероятность достижения ее цели $P_{д.ц}$; задаются требования к эффективности операции – требуемое (минимально допустимое) или оптимальное значение ($P_{д.ц}^{\text{треб}}$ или $P_{д.ц}^{\text{опт}}$) вероятности $P_{д.ц}^{\text{треб}}$ достижения цели операции; реализуется один из критериев оценивания эффективности операции: критерий пригодности $P_{д.ц} \geq P_{д.ц}^{\text{треб}}$ или критерий оптимальности $P_{д.ц} = P_{д.ц}^{\text{опт}}$.

Рассмотренная схема дает прямое оценивание эффективности операции. При исследовании эффективности операции по такой схеме автоматически решается проблема «эффективность – стоимость». В условиях, когда прямое оценивание невозможно, реализуется косвенное оценивание эффективности операции по показателям ее результатов, которое, конечно, уступает прямому оцениванию по информативности, а следовательно, и по объективности (достоверности).

Показатели эффектов операции и показатели ее эффективности различны. Существуют также два уровня оценивания качества операции: качества ее резуль-

татов как конечных итогов и ее эффективности. На рис. 1.13. приведена схема классификации показателей качества результатов и эффективности операции и критерии их оценивания.

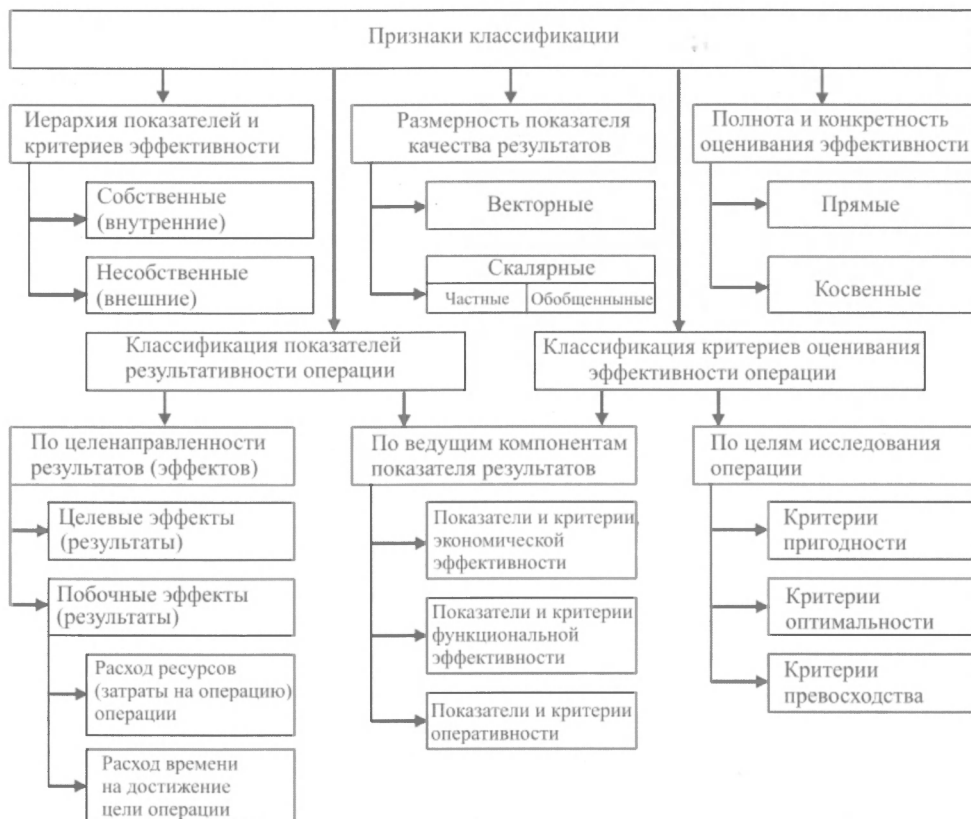


Рис. 1.13. Классификация показателей качества результатов и эффективности операции и критериев их оценивания

В соответствии с делением свойств системы и результатов операции на целевые и обеспечивающие n -мерный вектор частных показателей результатов операции E может быть представлен вектором, состоящим из вектора $E_{ц}$ целевых характеристик операции и вектора E , обеспечивающих эксплуатационно-технические характеристики системы и целенаправленного процесса ее функционирования. К обеспечивающим характеристикам в первую очередь относятся такие эксплуатационно-технические характеристики, как готовность и эксплуатационно-техническая надежность (безотказность). Поэтому вектор E_0 включает две группы компонентов: первая группа образует вектор характеристик готовности системы, а вторая группа – вектор характеристик эксплуатационно-технической надежности системы.

Итак, наиболее информативным комплексным показателем эффективности операции является вероятность $P_{д.ц}$ достижения цели операции. Она является од-

новременно и относительным и абсолютным показателем эффективности операции. С одной стороны, вероятность $P_{д.ц}$ характеризует эффективность операции с учетом соотношения целевого (основного) и побочных эффектов. С другой стороны, для фиксированного комплекса условий вероятность случайного события $E \in \{E_{д}\}$ есть абсолютная характеристика степени объективной возможности его реализации (появления, осуществления). Значение вероятности относительно, но эта относительность рассматривается по сравнению с единицей, т.е. с абсолютной мерой степени объективной возможности достоверного события. Следовательно, для объективного оценивания эффективности операции, характеризующей степень достижения ее цели, достаточно знать вероятность осуществления события $E \in \{E_{д}\}$, т.е. вероятность $P_{д.ц}$.

Наряду с показателем $P_{д.ц}$ широкое распространение при исследовании операций получили и целевые показатели или критериальные функции. Однако оба эти названия не точны, так как в этих показателях ни цель операции, ни критерий оценивания ее эффективности отражения не находят. Примерами целевых функций могут служить следующие зависимости:

$$\Psi_1 = \Xi; \Psi_2 = \frac{\Xi}{C}; \Psi_3 = \sum_{i=1}^n d_i x_i; \Psi_4 = \sum_{i=1}^n \beta_i f_i(x_i),$$

где, например, при $n=3$ $x_1=\Xi$, $x_2=C$, $x_3=\tau$.

Все эти функции, имея те или иные преимущества одна перед другой, обладают рядом существенных недостатков. Во-первых, в этих функциях не находит отражения цель операции. Во-вторых, использование этих функций, имевших искусственную размерность (или не имеющих ее), затушевывает физическую сущность задачи и затрудняет анализ и осмысливание результатов. В-третьих, ни одни из этих функций не учитывают затрат времени, а другие вообще не учитывают расхода ресурсов, что при комплексном исследовании эффективности недопустимо в принципе. В-четвертых, для ряда таких функций к отмеченным недостаткам добавляется еще их детерминированность, плохо соответствующая многим реальным практическим задачам.

Использование различных функций от компонентов вектора E результатов операции было вызвано следующими соображениями.

Любая операция характеризуется множеством эффектов (как положительных, так и отрицательных), часть которых находится в противоречии с целью операции. Поэтому оценить объективно результат операции одним числовым показателем не представляется возможным. В то же время совокупность противоречивых показателей частных результатов операции также не позволяет однозначно оценивать ее эффективность. Стремление к комплексному анализу эффективности операции приводит к использованию различных сочетаний компонентов вектора ее результатов в виде числовых функций от этих компонентов. Поэтому необходимо различать показатели эффективности и показатели эффектов (результатов) операции. Последние характеризуют операцию лишь косвенно, т.е. без учета ее цели. Первые

же показатели являются прямыми, поскольку они характеризуют непосредственно степень достижения цели операции.

При вероятностной формулировке задачи оценивания эффективности операции наряду с показателем ее эффективности в виде вероятности достижения цели операции может быть применен такой показатель, как гарантируемая вероятность достижения цели операции. Последний показатель позволяет оценивать эффективность уникальных (единичных) операций в отличие от вероятности $P_{дц}$, достаточно полно характеризующей эффективность лишь массовых операций.

Значение вероятности достижения цели операции $P_{дц}$ вычисляется, если известны законы распределения случайного вектора $\mathbf{E}$ и случайной области $\{\mathbf{E}_д\}$ его допустимых значений. Наиболее полной характеристикой вектора $\mathbf{E}$ является его функция распределения

$$\Psi_E(E') = P[(\Theta < \Theta') \cap (C < C') \cap (\tau < \tau')].$$

В задачах исследования эффективности часто более удобной формой закона распределения является функция

$$\Phi_E(E') = P[(\Theta \geq \Theta') \cap (C < C') \cap (\tau < \tau')].$$

На практике требования к результатам операции носят, как правило, односторонний характер. Так, целевой эффект должен быть не меньше требуемого (минимально допустимого) значения $\Theta_{\text{треб}}$, затраты должны быть не выше максимально допустимых $C_{\text{доп}}$, цель операции должна быть достигнута за время, не превышавшее максимально допустимое значение $\tau_{\text{доп}}$, называемое *директивным временем*. При этом область $\{\mathbf{E}_д\}$ допустимых результатов операции представляет собой октант с вершиной в случайной точке $\mathbf{E}_{\text{треб}} = (\Theta_{\text{треб}}, C_{\text{доп}}, \tau_{\text{доп}})$, т.е.

$$\{\mathbf{E}_д\} = [\Theta_{\text{треб}}, \infty) \times [-\infty, C_{\text{доп}}) \times [-\infty, \tau_{\text{доп}}),$$

где $\times$ – знак прямого (декартова) произведения множеств.

Случайность компонентов $\Theta_{\text{треб}}, C_{\text{доп}}, \tau_{\text{доп}}$ обусловлена случайностью условий применения системы, от которых зависят эти компоненты. Компоненты вектора $\mathbf{E}_{\text{треб}}$ являются предельно допустимыми значениями соответствующих результатов операции, определяющими границы области $\{\mathbf{E}_д\}$.

2. МЕТОДЫ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РАЗВИТИЯ И РАЗРАБОТКЕ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

2.1. Основы методологии военно-научных исследований

Основой проведения каждого научного исследования является методология. Она позволяет целесообразно выбирать и использовать методы научного исследования с учетом специфики решаемых задач. Изучая закономерности человеческой познавательной деятельности, методология вырабатывает на этой основе методы ее осуществления. Главная цель методологии – изучение и анализ методов, средств, приемов, о помощью которых приобретаются новые знания в науке, как на эмпирическом, так и на теоретическом уровнях познания. Важнейшей задачей методологии является изучение происхождения, сущности, эффективности и других характеристик методов познания.

Методология вообще – это учение о структуре, логической организации, методах и средствах деятельности. В современной научной литературе под *методологией* понимают методологию научного познания, т.е. учение о принципах построения, формах и способах научно-познавательной деятельности.

Методология рассматривается как область науки, изучающая общие и частные методы научных исследований, а также принципы подхода к различным типам объектов действительности и к разным классам научных задач. Можно выделить следующие основные положения:

методология – совокупность фундаментальных, прежде всего мировоззренческих принципов и научных положений в их применении к решению теоретических и практических задач; она призвана определить исходные позиции исследователя, обеспечить верный подход к явлениям, направить теоретическую и практическую деятельность в целом;

методология – учение о методах, призванное выяснить природу и содержание научных методов, обеспечить повышение их эффективности.

Между приведенными двумя положениями есть определенная близость, также между ними есть и различия: они в разной степени выражают специфичность понятия методологии. В своей совокупности эти положения позволяют определить методологию и в широком, и в узком смысле.

Методология в широком смысле осуществляет выработку общих установок или принципов, указывающих, каким требованиям должно отвечать научное исследование в целом. И в этом смысле методология научных исследований может

рассматриваться как совокупность общих философских установок и исходных принципов, регулирующих и оценивающих научную деятельность и научное познание в целом.

Методология в узком смысле (от греч. «методос» – метод и «логос» – учение) – это собственно учение о методах. Данное понимание методологии указывает на то, что термин «методология научного исследования» здесь относится к учению о нормах и правилах, регулирующих познавательную деятельность, направленную на достижение научных истин в виде эмпирических фактов, законов или теорий какой-либо науки. Методология как учение о методах не включает в себя методы, а превращает их в предмет исследования.

Метод есть совокупность приемов или операций практического или теоретического освоения действительности, определенным образом упорядоченная деятельность. Метод вооружает человека системой принципов, требований, правил, руководствуясь которыми он может достичь намеченной цели. Владеть методом – это значит знать, каким образом, в какой последовательности нужно совершать те или иные действия для решения различных задач, и уметь реализовать эти знания на практике. Метод выполняет регулятивную функцию, указывая, как должен вести себя субъект по отношению к познаваемому или преобразуемому объекту, какие операции (познавательные или практические) и в какой последовательности он должен совершить, чтобы достичь поставленной цели. В научных методах четко обнаруживается упорядоченность, систематичность, целенаправленность познавательных действий, контроль за используемыми операциями и получаемыми с их помощью знаниями, согласование результатов, добытых при помощи различных методов. Умению грамотно применять тот или иной метод на практике возможно научиться только при решении различных практических задач. *Овладеть методом науки можно только применяя этот метод к решению конкретных проблем опытного знания.*

Принцип – это исходное положение, руководящая идея о теории, науке, политике и т.д., основное правило деятельности, поведения и т.п.

Научный принцип – основополагающая руководящая идея в системе научного знания.

Методология решает проблемы различной широты и степени общности. Одни из них имеют общенаучное, философское значение, другие относятся к группе сходных наук или даже к одной частной науке, третьи связаны с отдельными исследованиями, с постановкой и решением отдельных задач в рамках той или иной науки. Соответственно и учение о методах должно содержать всеобщий, общий и специальный разделы.

Методология представляется на разных уровнях, в том числе всеобщем, общем и специальном. Роль общей методологии выполняет учение о методах, применяемых всеми или большинством наук. Специальная методология связана с методами, применяемыми отдельными науками.

Методология как учение о сущности методов и их применении в теоретической и практической деятельности представляется всеобщим (философским), общенаучным и специальным уровнями. Соответственно этим уровням в познании и практической деятельности применяют различные группы методов, образующих

определенную систему. В рамках этой системы методы классифицируются по различным основаниям, по степени их общности, т.е. по широте применимости в процессе научного исследования (рис. 2.1.).

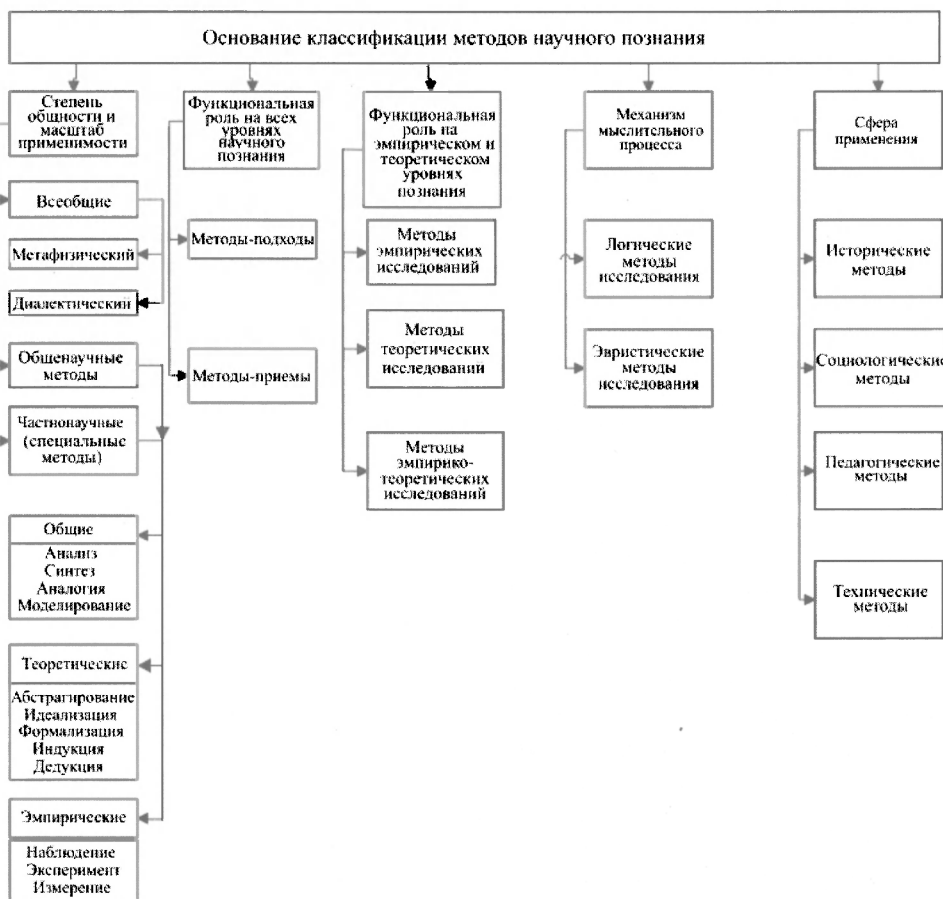


Рис. 2.1. Классификация методов научных исследований

Первым основанием классификации методов является степень их общности и масштаб применимости к различным сферам познания и практической деятельности. В соответствии с этим основанием принято выделять всеобщий (философский) метод, общенаучные и частнонаучные (специальные) методы.

Всеобщий (философский) метод познания есть совокупность наиболее фундаментальных принципов и приемов, регулирующих всякую познавательную и практическую деятельность. Из всеобщих методов в истории познания известны два: диалектический и метафизический. Это общеполитические методы. При метафизическом подходе объекты и явления окружающего мира рассматриваются изолированно друг от друга, без учета их взаимных связей и как бы в застывшем, фиксированном, неизменном состоянии. Диалектический метод, наоборот, предполагает изучение

объектов, явлений со всем богатством их взаимосвязей, с учетом реальных процессов их изменения, развития. В отличие от других методов он не является приемом или операцией процедурного характера и используется во всех областях науки и на всех этапах исследования. С середины XIX в. (в период третьей научной революции) метафизический метод начал все больше и больше вытесняться из естествознания диалектическим методом. Диалектический метод – система взаимосвязанных и взаимозависимых принципов и требований, ориентирующих людей в познавательной и преобразующей деятельности и показывающих, как и в каких формах следует осуществлять познание действительности, какие правила необходимо соблюдать, чтобы получить истинное знание об исследуемом объекте. В силу своей всеобщности диалектический метод нуждается в конкретизации и в дополнении другими, общенаучными и специальными методами, предназначенными для решения отдельных общепознавательных или специфических для каждой науки задач.

Общенаучные методы применяются во всех науках или в большинстве наук, т.е. имеют весьма широкий междисциплинарный спектр применения, и поэтому справедливо характеризуются как общенаучные. С их помощью решается какая-либо одна общепознавательная задача или небольшая совокупность взаимосвязанных задач определенного типа. Они имеют общую применимость лишь в каком-либо одном или нескольких, но не во всех отношениях. Классификация этих методов тесно связана с понятием уровней научного познания. К общенаучным методам исследования относятся: наблюдение, сравнение, измерение, эксперимент, абстрагирование, анализ и синтез, индукция и дедукция, аналогия и моделирование, идеализация, формализация, аксиоматический метод, исторический подход, логический метод, комплексный подход, системный подход, структурный подход, функциональный подход и другие методы. Различают два уровня научного познания: эмпирический и теоретический. Одни общенаучные методы применяются только на эмпирическом уровне (наблюдение, эксперимент, измерение), другие – только на теоретическом уровне (идеализация, формализация), но есть и такие (например, моделирование), которые используются как на эмпирическом, так и на теоретическом уровнях. Эмпирический уровень научного познания характеризуется непосредственным исследованием реально существующих, чувственно воспринимаемых объектов. На этом уровне путем проведения наблюдений, выполнения разнообразных измерений, постановки экспериментов осуществляется процесс накопления информации об исследуемых объектах, явлениях, производится первичная систематизация получаемых фактических данных в виде таблиц, схем, графиков и т.п. Кроме того, на эмпирическом уровне научного познания – как следствие обобщения научных фактов – возможно формулирование некоторых эмпирических закономерностей. Теоретический уровень научного исследования присущ рациональной (логической) ступени познания. На данном уровне происходит раскрытие наиболее глубоких, существенных сторон, связей, закономерностей, относящихся к изучаемым объектам, явлениям. Теоретический уровень – более высокая ступень в научном познании. Результатами теоретического познания становятся гипотезы, теории, законы.

Выделяя в научном исследовании два различных уровня – эмпирический и теоретический, не следует, однако, отрывать их один от другого и противопостав-

лять, поскольку они тесно взаимосвязаны. Эмпирический уровень выступает в качестве основы, фундамента теоретического осмысления научных фактов и получаемых статистических данных. В то же время теоретическое мышление неизбежно опирается на чувственно-наглядные образы (в том числе схемы, графики и т.п.), с которыми имеет дело эмпирический уровень исследования.

В свою очередь эмпирический уровень научного познания не может существовать без достижений теоретического уровня. Эмпирическое исследование обычно опирается на определенную теоретическую конструкцию, которая определяет направление этого исследования, обуславливает и обосновывает применяемые при этом методы.

К общенаучным методам относятся и математические методы. Объективной основой применения математических методов ко всем сферам теории и практики выступает материальное единство мира и единство качественной и количественной сторон всех явлений и объектов действительности. Каждый из общенаучных методов представляет собой совокупность принципов и вытекающих из них приемов и операций, посредством которых решаются отдельные общепознавательные задачи. Они не столь универсальны, как всеобщий философский метод, но и не связаны жестко со спецификой какого-либо одного объекта исследования, подобно узкоспециальным методам частных наук. Вместе с тем они обладают некоторыми чертами первого и вторых.

Широта сферы применения сближает общенаучные методы со всеобщим философским методом. Но каждый из этих методов выполняет свою специализированную функцию, обеспечивает решение определенной познавательной задачи, и это придает ему специальный характер, сближает со специальными методами частных наук.

Общенаучные методы имеют внутреннюю иерархию: некоторые из них приближаются по масштабу применимости к всеобщему философскому методу (например, системный подход), другие тяготеют к частнонаучным специальным методам.

Частнонаучные методы научного познания – это методы, используемые только в рамках исследований какой-либо конкретной науки или какого-либо конкретного явления. Каждая частная наука (биология, химия, геология и т.д.) имеет свои специфические методы исследования. Специальные методы частных наук или специфические методы применяются в отдельных науках, в узких, частных сферах деятельности. Специальные методы любой частной науки обусловлены спецификой исследуемой формы движения материи. Каждый из них представляет собой совокупность принципов и вытекающих из них приемов, операций, посредством которых решаются специфические познавательные задачи в частной области исследований. Как правило, частнонаучные методы содержат в различных сочетаниях те или иные общенаучные методы познания, базируются на них и могут включать наблюдения, измерения, индуктивные или дедуктивные умозаключения и т.д. Характер сочетания различных методов и его использования зависит от условий исследования, природы изучаемых объектов. Таким образом, частнонаучные методы не оторваны от общенаучных, напротив, они тесно связаны с ними, а также со всеобщим диалектическим методом, который как бы преломляется через них.

В частности, моделирование является методом познания окружающего мира, который можно отнести к общенаучным методам, применяемым как на эмпирическом, так и на теоретическом уровне познания. При построении и исследовании модели могут применяться практически все остальные методы познания.

Вторым основанием классификации методов, применяемых в научном познании, выступает их функциональная связь на всех уровнях этого познания. Одни из методов дают общую ориентацию подхода к исследованию явлений, процессов и объектов, другие – вооружают конкретными приемами этого исследования. Принято выделять методы-подходы и методы-приемы.

К *методам-подходам* относятся истерический и логический, количественный и качественный, содержательный и формальный, информационный, алгоритмический, вероятностный, натурный к модельный, комплексный, системный (системно-структурный, системно-функциональный) и другие подходы.

Метод-подход (методологический подход) можно определить как принципиальную методологическую ориентацию исследования, как точку зрения» с которой рассматривается объект изучения, как принцип, руководящий общей стратегией исследования. Иными словами, в понятии подхода логически всегда акцентируется основное направление исследования, своеобразный угол зрения объектов изучения. В отличие от этого понятие метода-приема характеризует познание с точки зрения того, как, каким образом ведется исследование, какова его «технология».

Важнейшую особенность подходов составляет их предельно широкий характер, применимость в масштабе всей науки. Все общенаучные подходы вытекают из всеобщего философского диалектико-материалистического метода, определяются им и, в свою очередь, непрерывно развивают его, дополняют определенными новыми чертами. Наиболее признанным и изученным среди подходов является системный подход, при котором все связи, элементы, функции и проблемы рассматриваются в виде взаимосвязанного целого.

К *методам-приемам* относятся наблюдение, спрос, индукция, дедукция и т.д.

Подлинно системное исследование объектов невозможно без проникновения в их структуру, без изучения их функций. Поэтому органическим дополнением, конкретизацией системного подхода являются две его ветви: структурный подход и функциональный подход. Проблематика этих подходов настолько тесно связана с системным подходом в целом, что их называют соответственно системно-структурным и системно-функциональным подходом.

Различие в структурном и функциональном подходах в основных чертах сводятся к следующему: если структурный подход рассматривается как отношение элементов в системе, ее упорядоченность, то функциональный подход позволяет исследовать организованность системы в смысле выполнения ею своих функций. Характерной особенностью современной науки стало также широкое распространение модельного подхода. В отличие от применявшегося с древних времен натурального подхода, заключающегося в непосредственном исследовании изучаемого объекта в естественных условиях его существования, модельный подход предполагает опосредованное познание, когда в силу различных обстоятельств вместо изучаемого объекта непосредственно исследуется другой, сходный с ним и более доступный

для этого естественный или искусственный, материальный или идеальный объект, который в определенных отношениях замечает изучаемый объект и дает о нем новые научные знания.

Третьим основанием классификации методов выступает их функциональная роль на основных уровнях познания: эмпирическом и теоретическом. Согласно этим уровням методы научного познания можно разделить на три группы: методы эмпирического исследования; методы, используемые на эмпирическом и теоретическом уровнях; методы теоретического исследования.

К *методам эмпирического исследования* относятся наблюдение, сравнение, счет, контроль, измерение, идентификация, эксперимент, а для всех социальных наук – опрос, сбор и изучение документов, вещественных свидетельств и т.п. С помощью этих методов опытным путем добываются исходные данные, производится их первичная обработка, проверяются результаты теоретических выводов.

Методы, используемые на эмпирическом и теоретическом уровнях исследования, составляют анализ и синтез, индукция и дедукция, абстрагирование и конкретизация, обобщение, моделирование, аналогия и другие методы.

К *методам теоретического исследования* относятся всеобщий философский метод и такие общенаучные методы, как идеализация, формализация, аксиоматический метод, восхождение от абстрактного к конкретному, гипотетический метод, определение, описание и интерпретация.

Границы между отдельными методами из указанных трех групп могут быть определены лишь приближенно. Так, например, эмпирические методы тесно связаны с логическими и никогда не существуют в чистом виде. Полученный эмпирический материал должен подвергаться логической обработке. Этой цели служат такие методы познания, как анализ и синтез, абстрагирование, аналогия и т.д.

Четвертым основанием классификации методов, применяемых в научных исследованиях, выступает механизм мыслительного процесса. Этот механизм включает в себя как рассудочно-логические средства, так и особые психологические приемы, в которых рассудочно-логические средства применяются фрагментарно, сопровождаясь творческим озарением, подсознательными импульсами. В соответствии с этим принято выделять логические и эвристические методы исследования.

Логические методы исследования основаны на строгих правилах формальной и диалектической логики. Они предполагают определенную методичность мышления и словесно-логическое оформление понятий. К этим методам относятся всеобщий философский метод, общенаучные методы, все специальные методы теоретического уровня и частично эмпирического уровня познания.

С термином «*эвристические методы*» связывают приемы познания, не имеющие готового алгоритма, а основанные на психологических механизмах. К *эвристическим методам исследования* относятся: интуиция – способность человека находить решение с помощью внутреннего озарения, допуская пропуски в цепи логических рассуждений; методы индивидуального стимулирования творческого процесса («спор с воображаемым оппонентом», «мысленный эксперимент»); методы коллективного самостимулирования («мозговой штурм» – активный творческий

поиск принципиально новых решений в трудных тупиковых ситуациях группой специалистов; метод экспертных оценок – опрос и анкетирование экспертов), методы аналогии и антианалогии и т.д. Эвристика в переводе с греческого буквально означает отыскать, открыть.

Эвристические методы основаны на таких психологических механизмах, которые, на первый взгляд, не связаны с логикой, действуют спонтанно (самопроизвольно). Однако ничего мистического в эвристических методах нет. Они свидетельствуют лишь о сложности человеческой психики, о процессах, происходящих в мозгу человека, которые стимулируют творческий мыслительный процесс.

Методы научных исследований можно также разделять в зависимости от сферы их применения на исторические, социологические, педагогические, технические и т.д. В этом случае в каждой из этих сфер наблюдается специфическое комбинирование всеобщего философского метода, общенаучных и специальных методов исследования.

Любое научное исследование предполагает наличие и использование не только соответствующих методов, но и средств исследований. Средства исследования, замещающие исследователя в некоторых его функциях, используются для выделения и изучения объектов в процессе научного исследования и обобщения полученных результатов. Они применяются также для замещения самого изучаемого объекта в случае необходимости применения устройств, моделирующих его поведение. Типовые варианты схем процессов исследования с использованием различных средств познания приведены на рис. 2.2, где И – исследователь; О – объект исследования; 1–3 – средства исследования (1 – средство измерения; 2 – устройство для обработки, анализа и обобщения результатов; 3 – модель объекта).

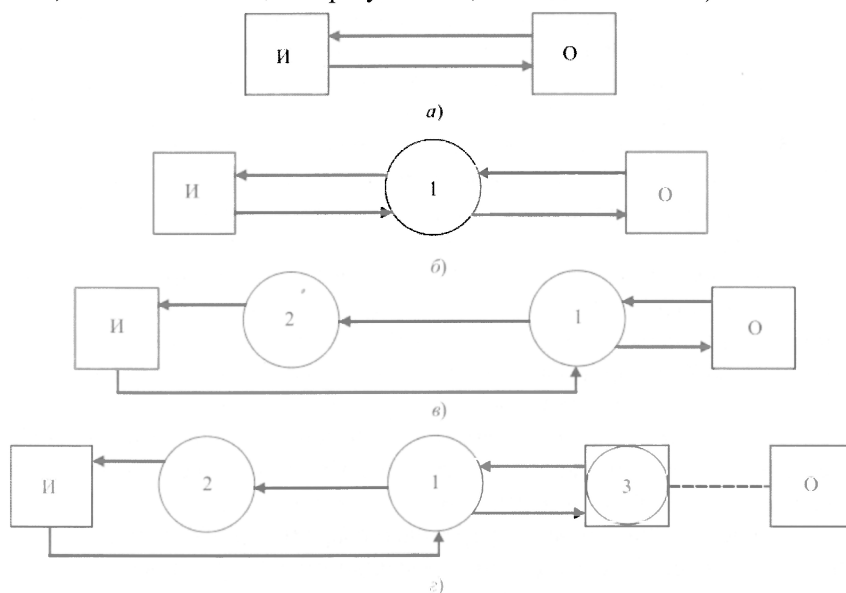


Рис. 2.2. Схема процесса исследования:

а – непосредственное исследование; б–г – опосредствованное исследование

Различают следующие средства исследования:

материальные (разнообразные средства измерений, системы обработки данных, аналоговые и цифровые вычислительные машины, автоматизированные информационно-измерительные системы и т.д.);

математические (математические модели, методы вычислений, математические теории и т.д.);

логико-языковые (различные искусственные языки; логические правила построения определений, выводов, доказательств и т.д.).

Материальные средства исследования являются наиболее распространенными и разнохарактерными. С их возникновением связано формирование эмпирических методов познания – наблюдения, измерения, эксперимента. При использовании материальных средств исследования предполагается их взаимодействие с познаваемым объектом, ибо экспериментальное изучение объектов невозможно, когда нет взаимодействия или когда по тем или иным причинам это взаимодействие не удастся фиксировать. Например, всякое измерение обязательно предполагает взаимодействие средств измерений с изучаемыми объектами. Поэтому здесь важную роль играет изучение системы взаимодействия приборов с этими объектами. Нельзя принимать результаты измерения без тщательного анализа характера взаимодействия, так как при неправильном его использовании могут возникать ошибочные представления о свойствах исследуемого объекта. Взаимодействие всегда должно изучаться и приниматься в расчет при конструировании материальных средств исследования.

Важнейшей особенностью развития современной науки является широкое применение *математических средств* исследования и методов, основанных на их использовании. С какой бы целью ни приходилось обращаться к математическим средствам и методам, какие бы познавательные задачи при их помощи ни решались, реально существующие объекты в целях изучения всегда должны быть представлены в специфической знаковой форме. Без этого познавательного шага математические методы не могут стать средством познания. Но как только на тех или иных основаниях удастся представить изучаемые объекты в математической форме, открывается возможность рассуждать о них на языке математики, вводить различные математические идеализации. Математические средства и методы на отдельных этапах изучения объектов могут заменить эмпирические познавательные действия. Однако какие бы математические средства и методы ни использовались в научном исследовании, полученные результаты нельзя рассматривать как конечный пункт познавательных действий. Они должны получать эмпирическую проверку или эмпирическую интерпретацию.

Важную роль в развитии науки играют *логико-языковые средства* исследования. Они используются для фиксации результатов исследования и способов их получения, образования понятий, выражения знаний в эмпирических науках и т.д.

Под логическим понимают такое оперирование знаниями и логико-языковыми средствами их выражения, которое позволяет получать новые знания, не обращаясь после каждого шага рассуждений к эмпирической проверке умозаключений.

В познавательной мыслительной деятельности особое внимание обращается на процесс построения выводов и доказательств, используемых в науке, на способы связывания утверждений и понятий в единую систему знаний о той или иной предметной области. В любом научном исследовании приходится не только строить рассуждения, но и контролировать процессы рассуждений и доказательств, использование языковых средств для построения выводов, доказательств, умозаключений. Усложнение познавательной деятельности в науке показало, что здесь нельзя полагаться только на интуицию и опыт. Необходима особая теория, позволяющая разрабатывать единообразные и строгие методы использования языка, методы доказательства в науке. Такие теории и методы разрабатываются логикой. Изучение средств и методов построения выводов в формальных системах, в том числе и в математике, является одной из самых важных задач математической логики.

В целом при проведении научных исследований приходится использовать разнообразие средств исследований в различных сочетаниях. При выборе средств исследований учитывается их влияние на качество исследования и в первую очередь на производительность исследовательского труда, точность и достоверность получаемых результатов.

Необходимо подчеркнуть, что любой метод сам по себе еще не предопределяет успеха в познании тех или иных сторон материальной действительности. Важно еще уметь правильно применять его в процессе познания.

2.2. Военная наука, ее задачи и содержание

Война — есть сложное социально-политическое явление. Выяснение социальной сущности войны и армии, определение места войны среди других общественных явлений, изучение вооруженной борьбы связано с исследованием самых разнообразных по характеру закономерностей — философских, социально-политических экономических, военных, технических. Дознание всех этих сложных и разнообразных закономерностей может быть осуществлено лишь объединенными усилиями большого числа наук, в том числе и собственно военной науки, изучавшей объективные законы вооруженной борьбы.

Общие законы войны выражают наиболее существенные связи и отношения между войной и другими явлениями общественной жизни: зависимость войны от политических целей господствующего класса, зависимость хода и исхода войны от соотношения экономических, научных, морально-политических и, собственно, военных потенциалов противоборствующих сторон. Предметом исследования законов войны выступают социологические и социальные закономерности возникновения и развития военно-политической практики классов и государств, а также ее отражения в специфических формах общественного сознания. Такой подход в исследовании дает всесторонние знания о происхождении, социальном характере, типах и роли войн в истории, социологических законах, обуславливающих их возникновение, ход и исход, раскрывает закономерности появления, социальную природу и функции вооруженных сил и составляет непосредственную методологическую основу военной теории и практики в обществе.

Из общих законов войны вытекают законы вооруженной борьбы, которые выражают наиболее существенные связи и отношения в главной решающей форме ведения войны – вооруженной борьбе. К числу основных законов вооруженной борьбы относятся: зависимость вооруженной борьбы от военно-политических целей войны; зависимость форм и способов ведения вооруженной борьбы от числа и качества вооружения и военной техники; зависимость эффективности боевых действий войск от соответствия форм и способов действий целям (задачам) и условиям обстановки; зависимость хода и исхода вооруженной борьбы от соотношения сил и средств сторон, морально-политического и психологического состояния личного состава, от уровня подготовки командований, штабов, войск и ряда других факторов. Законы вооруженной борьбы находят свое отражение в составных частях военной науки.

Объектом изучения военной науки является война, ее предметом исследования выступают объективные законы вооруженной борьбы в войне.

Занимаясь проблемами вооруженной борьбы и ее непосредственного обеспечения (экономического, духовного, политического), военная наука не изучает войну в целом, ее общесоциологические законы, но руководствуется методологическими положениями учения о войне и армии и учитывает выводы всех звеньев военно-научного знания, не входящего в военную науку.

Поскольку военная наука больше всего связана с познанием вооруженной борьбы, ей принадлежит главная роль в разработке способов достижения политических целей насильственными средствами. Она представляет собой систему знаний о характере и законах войны, подготовке вооруженных сил и страны к войне и способах ее ведения.

Военная наука изучает законы войны, отражающие зависимость хода и исхода войны от политики, экономики, соотношения морально-психологических, научно-технических и военных возможностей воюющих сторон, а также основные процессы подготовки и ведения войны, обусловленные ее масштабами, составом участвующих сторон и средствами вооруженной борьбы.

Важнейшими составными частями военной науки являются: теория военного искусства; теория военного строительства; теория воинского обучения и воспитания (теория оперативной и боевой подготовки войск); теория военной экономики и тыла; теория управления вооруженными силами (рис. 2.3). Она широко использует также результаты исследований общественных, естественных и технических наук для создания новых средств борьбы и обеспечения боевых действий.

Теория военного искусства представляет собой ядро военной науки. Она познает закономерности, характер, принципы и способы ведения военных действий в стратегическом, оперативном, тактическом масштабах и соответственно включает теории стратегии, оперативного искусства и тактики.

Теория стратегии как высшая область теории военного искусства дает теоретические основы планирования, подготовки и ведения войны и стратегических операций, рекомендации по управлению вооруженными силами, учету и использованию морально-политических и экономических возможностей государства в интересах успешного ведения военных действий, организации стратегического тыла, гражданской обороны и других видов обеспечения.

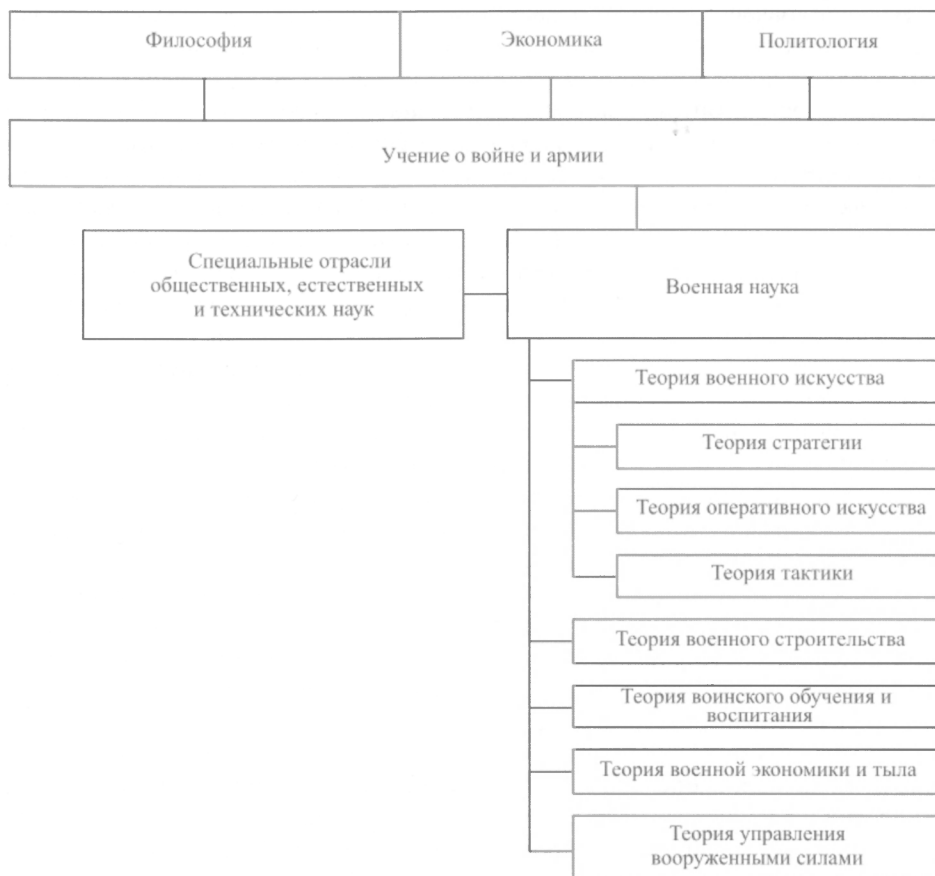


Рис. 2.3. Структурные элементы военной науки и ее место в системе наук

Занимая высшую ступеньку в иерархической лестнице военного искусства, стратегия определяет направления развития оперативного искусства и тактики. Состояние, уровень развития стратегии – это, по существу, главный показатель уровня развития военного искусства в целом.

Оперативное искусство занимает промежуточное положение между стратегией и тактикой. *Теория оперативного искусства* разрабатывает принципы и способы подготовки и ведения общевойсковых (общешлотских) совместных и самостоятельных операций (боевых действий) оперативными объединениями и соединениями видов вооруженных сил, изучает формы и методы управления войсками (силами), учет и использование морально-психологического факта при подготовке и ведении операций, вопросы их оперативного материально-технического и тылового обеспечения. В отличие от стратегии, которая как научная дисциплина является единой для всех видов вооруженных сил, оперативное искусство дифференцируется по видам вооруженных сил.

К основным задачам теории оперативного искусства относятся: исследование закономерностей, содержания и характера современных операций и других форм оперативного применения объединений, разработка способов подготовки и ведения операций (боевых действий), способов и методов организации и поддержания взаимодействия, связи, всестороннего обеспечения войск (сил), участвующих в операциях (боевых действиях), и управлении; разработка оперативных требований к организации и вооружению объединений; выработка рекомендаций по оперативному оборудованию театров военных действий, изучение взглядов вероятных противников на ведение военных действий оперативного масштаба.

Теория тактики исследует закономерности, характер и содержание боя, разрабатывает способы его подготовки и ведения соединениями, частями и подразделениями в различных сферах (на суше, в воздухе, на воде). В соответствии с этим она включает теорию тактики общевойскового боя соединений, частей и подразделений видов вооруженных сил, родов войск (сил) и специальных войск. Теория тактики исследует также вопросы боевого, специально-технического и тылового обеспечения боя.

Тактика находится в диалектической взаимосвязи с оперативным искусством и военной стратегией, положениями которых она руководствуется. Она более подвижна, динамична в своем развитии, быстро отзывается на все изменения в материальных средствах ведения войны, в личном составе.

С учетом специфики различных областей военной теории и практики военная наука изучает проблемы руководства вооруженными силами и управления войсками (силами) в стратегическом, оперативном и тактическом масштабах. В каждой специализированной теории военной науки в качестве ее элемента существует соответствующая ей специализированная теория управления, а в качестве элемента общей теории военной науки – теория управления вооруженными силами.

Теория управления разрабатывает способы руководства вооруженными силами и управления войсками (силами). В рамках этой теории изучаются особенности проявления законов и принципов управления в вооруженных силах, системы управления, методы работы командования, штабов, вырабатываются требования к техническим средствам управления, а также к информационному обеспечению.

Важное место в военной науке занимает *специализированная теория военного строительства*, которая раскрывает вопросы состава и организационной структуры вооруженных сил в мирное и военное время, соотношения видов вооруженных сил и родов войск, сроки их отмотилизования, комплектования и развертывания подготовки резервов, организации военной службы и другие вопросы.

Теория воинского обучения и воспитания познает закономерности принципов воинского обучения и воспитания, разрабатывает формы и методы подготовки сознательных и умелых защитников Родины, рекомендации по формированию у воинов высоких патриотических, психологических, морально-боевых и военно-профессиональных качеств, слаживания подразделений, частей, кораблей, соединений с целью обеспечения высокой боеспособности и боеготовности вооруженных сил. Она опирается на данные военной педагогики и военной психологии.

Теория военной экономики и тыла исследует вопросы накопления и использования материальных средств для обороны страны и обеспечения деятельности вооруженных сил. Она вырабатывает требования к военной экономике в соответствии с характером войны, военно-экономические рекомендации по ослаблению экономики противника, намечает пути обеспечения живучести своей экономики во время войны, исследует закономерные связи между обществом и вооруженными силами, определяющие экономическое обеспечение строительства вооруженных сил в мирное время и ведения вооруженной борьбы в период войны. В рамках этой теории изучаются закономерности и принципы организации и функционирования тыла вооруженных сил, особенности управления им, вопросы взаимосвязи тыла с военной экономикой. Специфична по своему содержанию и занимает особое место в системе знаний о войне и армии теории гражданской обороны, которая освещает вопросы защиты населения и объектов тыла страны от средств нападения противника, проблемы устойчивости экономики, организации спасательных и неотложных аварийно-восстановительных работ в очагах поражения и районах стихийных бедствий. Она вырабатывает рекомендации по совершенствованию системы управления гражданской обороной.

Военная наука как система знаний о характере и законах войны, о подготовке вооруженных сил и страны к войне и способах ее ведения изучает войну как сложное социально-политическое явление совместно с другими науками.

Наибольшее влияние на развитие военной науки оказывают диалектика, экономика, логика и методология военно-научного познания.

Изменения в способах вооруженной борьбы и характере войны приводят к расширению связей военной науки с общественными, естественными, техническими науками и выделение в них специальных отраслей научных знаний, которые органически связаны с военной наукой и непосредственно направлены на обеспечение потребностей военного дела.

Война – явление общественное. Она имеет ярко выраженное политическое содержание, представляет собой продолжение политики, реализацию политических целей насильственными средствами. Война содержит и все остальные стороны, характерные для жизни общества: экономическую, идеологическую, психологическую и другие. В войне, как и во всех других общественных процессах, действуют люди. Все это означает, что военная наука имеет черты, характерные и для общественных наук. В современных условиях война оказывает исключительно большое влияние на все стороны жизни общества, охватывает многие военно-социальные процессы. Необходимость исследования подобного рода процессов обусловила появление таких военно-специальных наук, как военная психология, военная педагогика, военно-юридические науки. Они отражают процессы, занимающие пограничное положение между военной деятельностью и соответствующими видами невоенной деятельности, и по своему содержанию входят, с одной стороны, в состав военной науки, а с другой стороны – в специальные отрасли соответствующих наук.

Боевые действия протекают в пространстве и времени; управление войсками является процессом получения, переработки и передачи информации; ведение воо-

руженной борьбы требует значительных энергетических затрат и т.д. Все это свидетельствует о том, что военная наука развивается и на стыке с естественными науками, прежде всего с физикой и химией.

Большое значение для развития военного дела имеет математика, которая дает методы количественного оценивания многих сторон боевой обстановки и прогнозирования хода и исхода операции (боя) в интересах разработки рационального решения и оптимального плана ее подготовки и ведения. Велика роль математики в оценивании эффективности мероприятий, направленных на дальнейшее совершенствование вооружения и способов его применения, а также методов управления войсками.

Современные боевые действия являются гигантскими техническими процессами, в них принимают участие сложные военно-технические системы с высоким уровнем автоматизации управления. В этих условиях военные исследования тесно переплетаются с анализом возможностей и перспектив развития военной техники. Для ведения войны необходимо производство вооружения и военной техники, обеспечение средств, строительство различных сооружений, военных объектов и т.д. Особенность этих видов деятельности состоит в том, что они являются преобразованными, применительно к целям войны, видами технической деятельности, каждый из которых отражается в содержании соответствующих военно-технических наук.

Подготовка страны к войне, ведение военных действий, военное строительство связаны в той или иной степени с использованием всего арсенала научных знаний. Некоторые из них в силу непосредственной близости к военному делу выделяются в систему военно-специальных наук, к числу которых можно отнести, например, военную географию, военно-прикладные разделы геофизики, военную геодезию, военную топографию, военную навигацию, военную метеорологию и др.

В познании закономерностей развития военного искусства, строительства и подготовки вооруженных сил важную роль играет знание исторических наук: история войн, история военного искусства, история развития того или иного вооружения и вида военной техники, история строительства вооруженных сил.

Важной особенностью развития военной науки, как и других наук, является интенсивный процесс ее дифференциации и специализации различных отраслей военно-научных знаний по видам Вооруженных Сил и родам войск и службам. Вместе с тем происходит и процесс интеграции, когда на стыке ранее разобщенных теорий появляются новые, относительно самостоятельные теории. Интеграция военно-научного знания требует цельного рассмотрения военной науки. Она представляет собой сложную, но единую систему военно-научных знаний, ибо она имеет единую объективную основу, отражая в своем содержании один главный объект – войну, как целостный процесс с общими и частными закономерностями, выражающими ее различные связи и отношения, тенденции развития.

Характерной чертой современной военной науки является сочетание в ней признаков фундаментальной и прикладной наук.

Фундаментальные исследования военной науки направлены на продолжение изысканий с целью раскрытия военно-стратегического характера возможной войны, основных черт и способов подготовки и ведения общевойсковых совместных операций, операций объединений, общевойскового, воздушного и морского боя в

условиях применения как ядерного оружия, так и обычных средств поражения; на выявление новых направлений в развитии вооружения и военной техники, способов их эффективного применения.

Особую важность фундаментальные военно-научные исследования приобретают в прогнозировании характера будущей войны, изыскании наиболее эффективных способов ее ведения, определении магистральных направлений строительства Вооруженных Сил.

Решение фундаментальных проблем военной науки является базой развития прикладных военно-научных исследований.

Прикладные исследования военной науки непосредственно связаны с военной практикой. Они обобщают опыт боевой и оперативной подготовки, войсковых учений, повседневной жизни войск. Вырабатываемые на основе этих исследований рекомендации используются для повышения боевой готовности соединений и частей, совершенствования процессов оперативной и боевой подготовки войск, а также для многих других целей.

Структура военной науки находит свое проявление в ее функциях. Как и любая наука, она прежде всего выполняет познавательную и прогностическую функции.

Познавательная функция проявляется в раскрытии сущности объекта исследования, содержания процессов и законов характерных для него. Предвидеть развитие тех или иных процессов – одна из основных задач любой науки. По своей сути военная наука является наукой о будущей войне. Предпосылкой научного военного предвидения является существование объективных законов общественного развития, объективных законов войны, действие которых определяет внутреннюю логику развития социальных, военных процессов.

Большое значение для строительства Вооруженных Сил имеет предвидение социально-политического и военно-технического характера, типов и видов войн современной эпохи. С учетом этих прогнозов и на основе предвидения развития военно-политической ситуации в мире, а также перспектив развития науки и техники, экономики и социальной структуры в целом и ведется строительство Вооруженных Сил. С точки зрения глубины и характера предвидения явлений войны военно-теоретическое предвидение подразделяется на два уровня: *первый уровень* – предвидение условий возникновения, хода и способов ведения войны при ныне существующем вооружении и военной технике, при данном соотношении сил; *второй уровень* – предвидение перспектив развития Вооруженных Сил, возможности возникновения качественно нового их этапа, изменения социально-политической обстановки в мире.

К числу задач военного предвидения первого уровня относится обоснование возможного времени развязывания войны агрессором; прогнозирование возможного способа развязывания войны агрессором, масштабов применения различных сил и средств в ее начале; определение вероятного хода войны, ее возможных этапов, способов ведения. Решение этих задач дает возможность сформулировать обоснованные научные рекомендации по кардинальным проблемам военного строительства, развития военной теории.

Военно-научное предвидение второго уровня предполагает решение, по крайней мере, трех важнейших задач. Первая задача – определение направления военно-технического прогресса, путей совершенствования существующих и появления качественно новых видов вооружения и военной техники. Вторая задача – выявление путей дальнейшего изменения структуры Вооруженных Сил, соотношения родов войск, средств нападения и защиты. Третья задача – определение перспективных проблем, направленных на повышение боевой готовности войск в соответствии с характером будущей войны. Решение этих задач является теоретической предпосылкой долгосрочного планирования развития Вооруженных Сил, а также вооружения и военной техники.

Особое значение в настоящее время приобретает военно-техническое прогнозирование. Поэтому советская военная наука должна предвидеть военно-технический характер возможной войны, прогнозировать тенденция развития вооружения и военной техники, а через нее и всего военного дела.

В любой науке единство предмета требует единства подхода к его исследованию. Единство и взаимосвязь различных отраслей военно-научных знаний оказывают существенное влияние и на методы военно-научных исследований, их использование в решении конкретных военно-научных проблем. В настоящее время широкое применение в военно-научных исследованиях получил системный подход с широким использованием моделирования, исследования операций и других методов системного анализа.

Военная наука занимает особое положение в общей системе знаний о войне и армии. Военная наука составляет основное теоретическое содержание военного дела. Она входит в военно-научный потенциал страны и вместе с тем выступает элементом боевой мощи армии. Наибольшее влияние на развитие военной науки оказывают философия, экономика, логика и методология военно-научного познания, учение о войне и армии.

Правильное определение места военной науки в системе знаний о войне и армии, ее предмета и структуры имеет не только теоретическое, но и большое практическое значение. Классификация военной науки способствует научно обоснованному решению таких вопросов, как: выявление тех отраслей науки, на развитии которых необходимо сосредоточить основные усилия в соответствии с практическими потребностями; организация и структура научных учреждений; системный подход к планированию научно-исследовательских работ; объединение и координация усилий научных коллективов для исследования наиболее сложных и актуальных проблем; определение содержания учебных программ в вузах и войсках.

2.3. Методы и средства исследований систем ВВТ

Применительно к военному делу в зависимости от сферы применения военно-научные методы исследования принято разделять на военно-исторические, военно-социологические, военно-педагогические, военно-стратегические, оперативно-тактические, военно-технические, военно-экономические и другие методы (рис. 2.3).

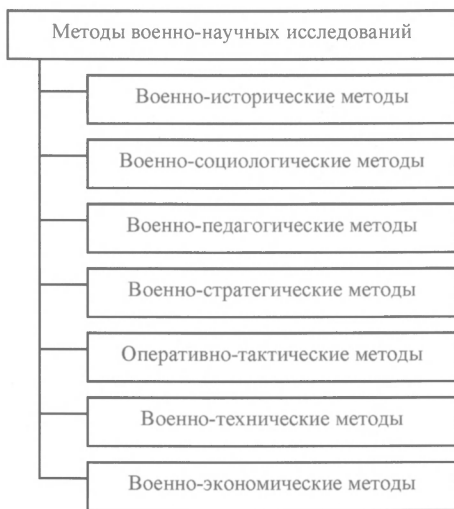


Рис. 2.3. Методы военно-научных исследований

Военно-исторические методы предполагают системный анализ факторов, влияющих на историческое развитие военной деятельности, анализ причинно-следственных связей в истории войн, процесса их подготовки и ведения, методологически строгое изучение военно-исторических документов, литературных источников и других материалов.

Военно-социологические методы базируются на применении анализа и теоретического обобщения социальных военных факторов, главным образом в единстве функционального, структурного и логического подходов.

Военно-педагогические методы связаны с развитием системы воинского обучения и воспитания.

Военно-стратегические методы – это совокупность приемов и способов исследования собственно военной обстановки стратегического масштаба, а также обуславливающих ее военно-политических, военно-экономических, военно-идеологических, военно-дипломатических и иных процессов.

Оперативно-тактические методы – это группа приемов и способов, направленных на познание боевой обстановки, на исследование закономерностей вооруженной борьбы оперативного и тактического масштаба.

Военно-технические методы используются для исследования особой разновидности техники – военной техники, предназначенной для ведения вооруженной борьбы. В сферу действия этих методов входят военно-технические задачи планирования развития и тактико-техничко-экономического обоснования вооружения, его разработки, производства, испытаний, эксплуатации и ремонта.

Военно-экономические методы связаны с исследованиями экономической стороны военного дела. Они используются для решения разнообразных военно-экономических проблем и задач, например таких, как задачи рационального распределения и эффективного использования ресурсов, выделяемых на оборону страны.

Методы научного исследования можно классифицировать и по другим основаниям. Современная наука вооружает исследователя богатым арсеналом методов, круг которых все расширяется. Стержневое значение среди всех этих методов имеет всеобщий философский метод. Научные методы являются важнейшим логическим средством получения и развития научных знаний. Однако они выполняют свою роль эффективно, лишь будучи связанными в единую систему. Различные методы выполняют разные функции, сопровождая и обеспечивая весь цикл познавательной деятельности.

Научное исследование развивается в соответствии с общими закономерностями познания, требуя использования определенных методов, средств и обеспече-

ния (рис. 2.4). Оно осуществляется на эмпирическом и теоретическом уровнях, через смену основных форм: описание фактов, постановка проблем, выдвижение гипотез, их доказательство, построение теории, формулирование выводов и принятие практических решений. Названные уровни и формы требуют соответствующих методов; одни из них призваны обеспечить добывание исходного фактического материала с учетом особенностей и условий научного исследования, другие – переработку и анализ этого материала, его обобщение, третьи – проверку получаемых результатов и их практическое использование.

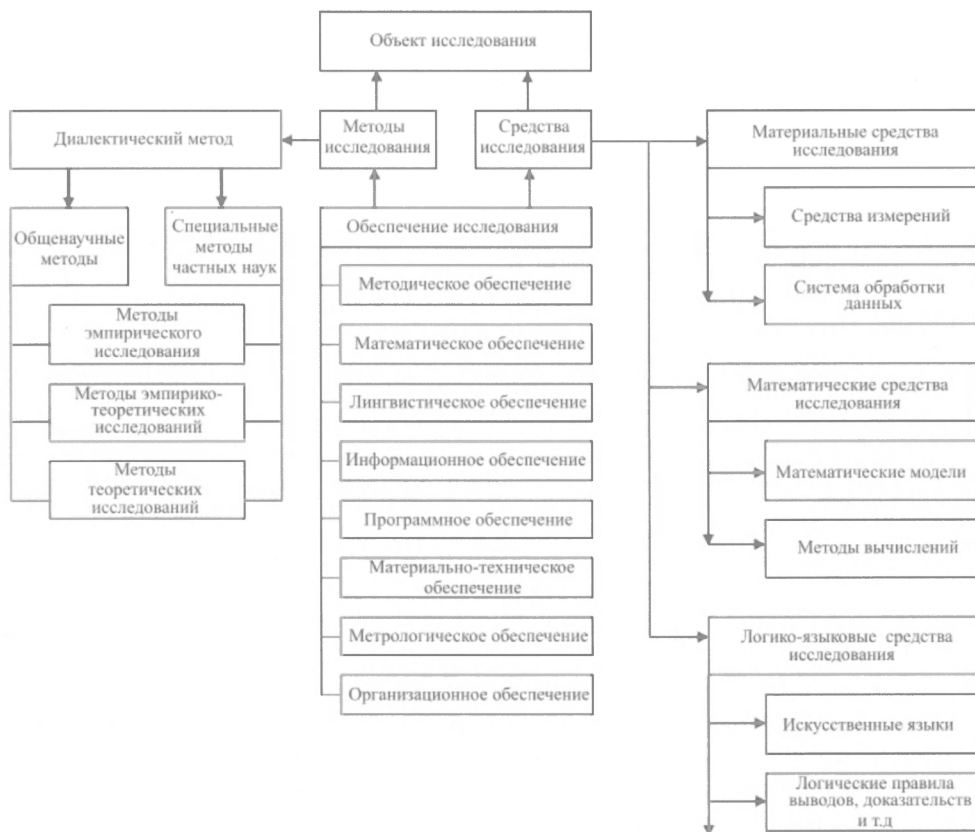


Рис. 2.4. Методы, средства и обеспечение научных исследований

На *эмпирическом этапе* исследований методы обеспечивают получение исходного фактического материала, описание, упорядочение, классификацию фактов, проверку конечных теоретических выводов. На *теоретическом этапе* исследований различные логические операции позволяют осуществить всестороннюю разработку научных идей, гипотез, теоретических положений,

Характер применяемых методов, состав и связи между ними обусловлены спецификой научного исследования, особенностями его объектов, условий и задач,

а также логической последовательностью научного исследования, основными этапами и формами, в которых существует и развивается научное знание.

Каждый из общенаучных и специальных методов научного исследования имеет свои преимущества и свои ограничения в применении. Каждый из них выражает какую-то сторону, черту единого познавательного процесса, поэтому в чистом виде может быть выделен лишь в абстракции. В реальном процессе научного исследования все они взаимосвязаны, взаимодействуют и взаимно дополняют друг друга. Связи и взаимодействие между всеми применяемыми методами позволяют говорить об их целостной системе, состоящей из методов различной универсальности действия и различного функционального назначения. Развитие науки возможно только при использовании результатов применения этих методов с соблюдением всех требований всеобщего метода познания.

На основе выбора методов и средств, используемых на отдельных этапах исследования, определяется общая методика исследования – совокупность методов и приемов, необходимых для его проведения.

Необходимость использования широкого диапазона методов и средств научных исследований, начиная с классических и кончая современными методами и средствами, учитывающими системный характер объекта исследования, затрудняет изучение методов и требует их тщательного отбора. Одними из основных принципов, которыми необходимо руководствоваться при этом, являются принципы отбора методов по признакам их результативности и экономичности, частоты применения, полноты охвата решаемых задач и степени адекватности этим задачам, точности и достоверности получаемых результатов, степени учета свойства системности объекта исследования.

Применительно к вооружению и военной технике на первый план выдвигаются методы системных исследований, применяемые при планировании развития вооружения и военной техники, обосновании требований к вновь разрабатываемым образцам вооружения, выполнения проектно-исследовательских работ, проверке соответствия ТТХ вооружения и военной техники требованиям ТТЗ при испытаниях, обосновании оптимальных способов боевого применения вооружения в динамически изменявшейся обстановке при интенсивном противодействии противника, определении боевых возможностей вооружения и разработке направлений его совершенствования и модернизация.

Основные направления исследования систем ВВТ. Конкретные направления и содержание военно-научных исследований в области вооружения и военной техники, а также применяемые методы и средства исследований зависят от задач, решаемых на различных стадиях жизненного цикла образцов вооружения. На рис. 2.5 приведены основные области военно-научной деятельности, определявшие направления военно-научных исследований вооружения и военной техники. Отсюда следует, что исследованию и обоснованию подлежат принципы построения, технические решения, перспективы развития, способы применения и условия использования вооружения и военной техники.

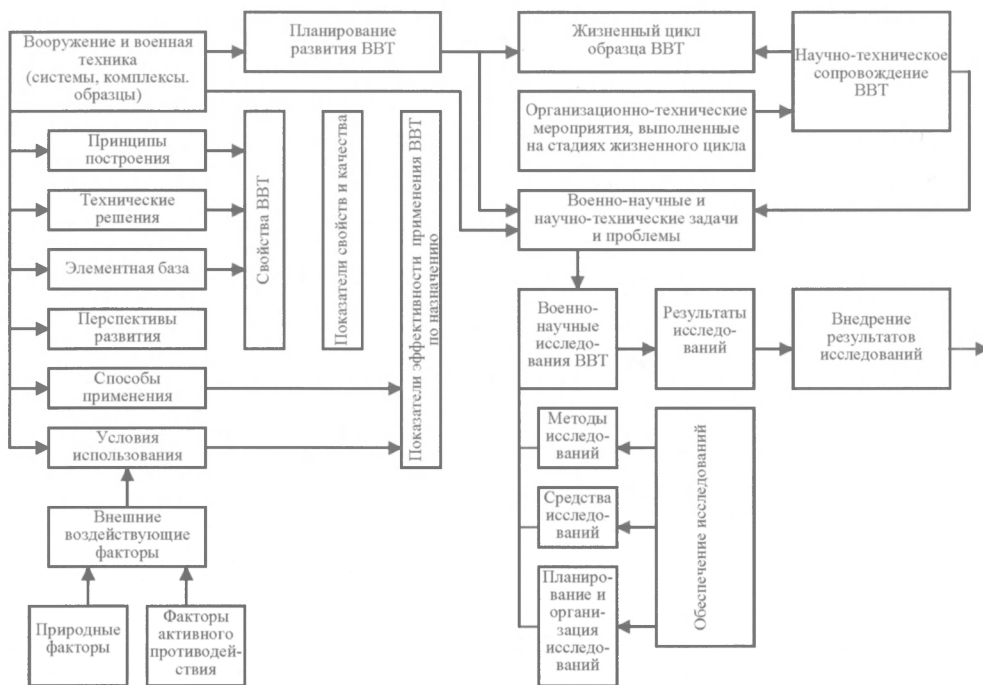


Рис. 2.5. Основные области военно-научной деятельности, определяющие направления исследования ВВТ

К важнейшим задачам, решаемым в процессе проведения военно-научных исследований, относятся задачи обоснования и выбора тактико-технических характеристик и способов боевого применения изделий при выполнении прикладных НИР и разработке ТТЗ, отработки технических решений при проектировании, проверки выполнения заданных требований и оценивания боевых возможностей исследуемых образцов вооружения при испытаниях (рис. 2.6). На решение этих задач направлены тактико-техничко-экономическое обоснование вооружения и военной техники, а также испытания и контроль их качества (рис. 2.7).

Современное вооружение, как правило, относится к сложным техническим системам. В процессе создания и использования техническая система проходит определенную последовательность стадий жизненного цикла. Жизненный цикл во времени может быть условно представлен тремя периодами (фазами): периодом обоснования, периодом создания системы и периодом эффективной жизни.

В течение периода обоснования всесторонне и тщательно обосновывается необходимость создания системы, оцениваются предполагаемые сроки разработки и затраты на весь жизненный цикл, возможность реализации системы и ожидаемая эффективность ее применения по назначению. На основании полученных результатов формулируются требования к системе, и принимается решение о начале разработки, которая должна осуществляться в соответствии с комплексной программой создания и внедрения новой техники (рис. 2.8).



Рис. 2.5. Задачи и методы системных исследований ВВТ

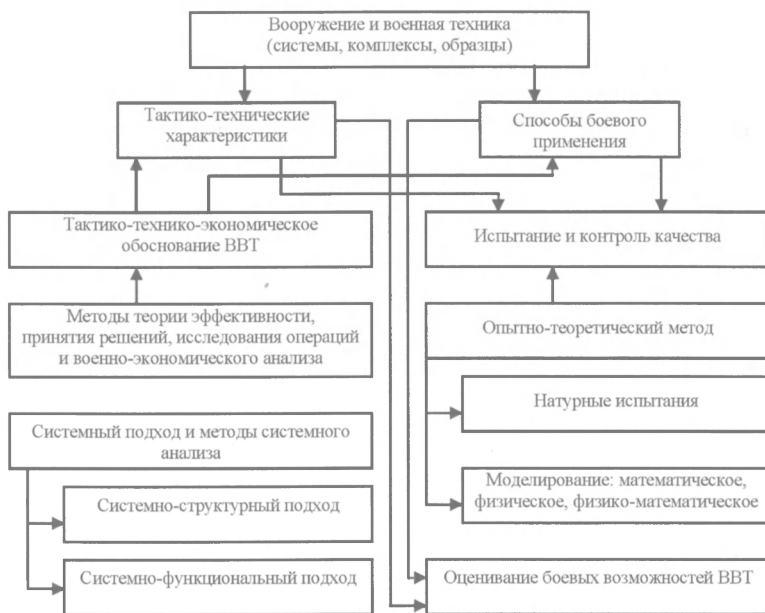


Рис. 2.7. Задачи и методы военно-научных исследований ВВТ

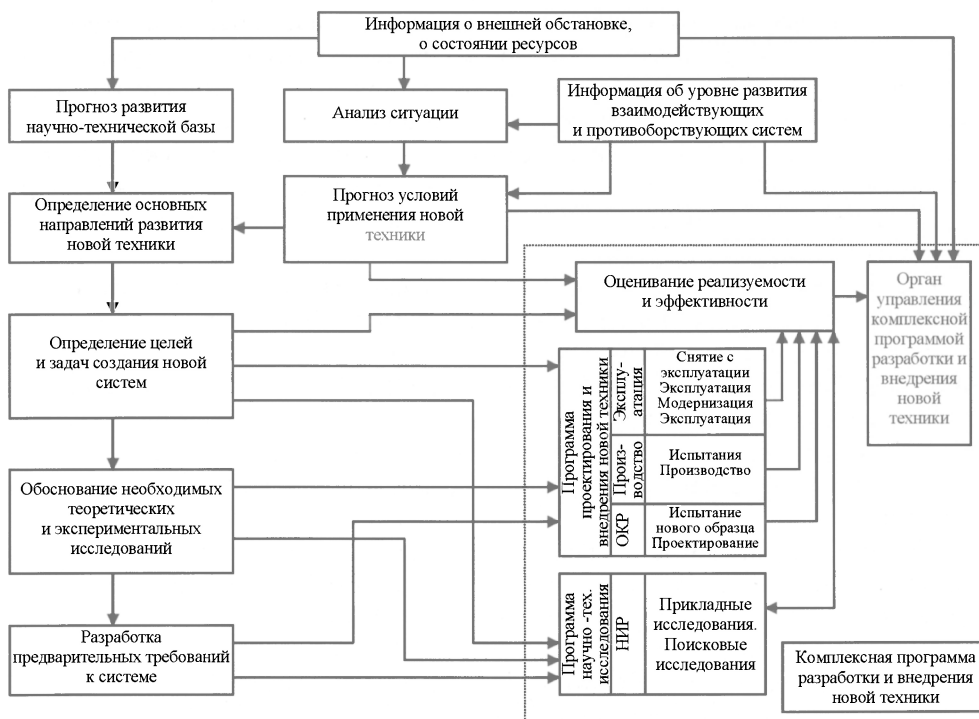


Рис. 2.8. Схема процесса разработки и реализации комплексной программы создания новой техники

Эта программа состоит из программы научно-технических исследований и программы проектирования и внедрения системы. Программа научно-технических исследований предполагает проведение поисковых и прикладных научно-исследовательских работ.

Поисковые исследования – это исследования, направленные на изыскание путей использования научно-технических открытий и результатов фундаментальных исследований в целях разработки образцов новой техники. Поисковые исследования направлены на получение принципиально новых технических решений, на выявление перспектив развития техники. В процессе этих исследований обобщаются частные решения, систематизируются ранее известные подходы, разрабатываются принципы построения систем и развития элементной базы. Заканчиваются поисковые исследования получением теоретических и экспериментальных результатов, служащих основой для развертывания фронта прикладных исследований, а иногда и непосредственно для разработки технических предложений или выполнения опытно-конструкторской работы.

Прикладные исследования направлены на выявление и анализ возможностей использования результатов поисковых работ с целью дальнейшего развития конкретных видов техники и создания новых систем. В процессе их проведения рассматриваются возможные варианты построения системы, оценивается реализуемость и эффективность вариантов, разрабатываются технические требования к системе.

По итогам проведения научно-исследовательских работ принимается решение о возможности непосредственной разработки системы на основе программы проектирования и внедрения новой техники, которая включает в себя опытно-конструкторские работы, производство, освоение системы и эксплуатацию.

Период создания системы включает в себя опытно-конструкторскую работу и производство. К началу выполнения опытно-конструкторской работы заканчивается формирование конкретных тактико-технических требований, предъявляемых к разрабатываемому образцу.

Необходимый уровень качества и перспективность новой техники закладывается на ранних стадиях при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, когда прорабатываются, анализируются и оцениваются альтернативы и избирается оптимальный вариант системы. С целью повышения обоснованности принимаемых решений при выборе варианта системы необходимо обеспечить исследование достаточно большого числа альтернатив, расширить экспериментальную проработку различных вариантов образцов или наиболее важных их составных частей.

Решения, принимаемые в процессе создания систем, должны опираться на объективные оценки реализуемости и эффективности ожидаемого применения систем в условиях заданных сроков разработки и затрат ресурсов.

Период эффективной жизни включает в себя развертывание системы для эксплуатации, эксплуатацию, научно-техническое сопровождение системы и ее модернизацию, снятие с эксплуатации. Возможность наращивания и модернизации системы в процессе ее эксплуатации предусматривается при разработке за счет функционального резерва развития системы, обеспечивающего продление периода полезной жизни образца,

Управление разработками по созданию новой техники можно представить как процесс реализации некоторой целевой комплексной программы развития техники, когда определены цели, ресурсы и время. Комплексный характер программы означает, что она охватывает все этапы создания технической системы, увязывая функциональные связи между всеми исполнителями.

В общем случае *программа* – это ведущий к планомерному осуществлению, направленный на достижение конкретной конечной цели и приуроченный к определенным срокам комплекс взаимосвязанных мероприятий, обеспеченный необходимыми ресурсами. Здесь мероприятие представляется как совокупность взаимосвязанных общностью цели мер, требующая для своей реализации подготовительной работы – планирования, обеспечения ресурсами и т.д.

Стержень программы составляет система «цели и задачи – необходимые ресурсы – комплекс взаимосвязанных мероприятий». Главное в программе то, что все ее стороны и элементы подчинены конечной цели, ради достижения которой программа разрабатывается и осуществляется.

Программа предусматривает выполнение совокупности научно-технических, организационных и экономических мероприятий, сбалансированных по ресурсам и срокам.

Разработка программы включает в себя анализ проблемы, формулирование целей и задач, обоснование необходимости программного решения проблемы, рассмотрение вариантов реализации программы с оценением ожидаемой эффективности каждого варианта, установление исполнителей и порядка реализации программы с указанием сроков и ресурсов, оценивание ожидаемого конечного результата.

В рамках целевой комплексной программы развития техники реализуется программно-целевой метод планирования и управления, базирующийся на целевом и программном подходах.

Целевой подход – это подход, основанный на системе методов и методических приемов, обеспечивавших строгую ориентацию управленческой деятельности на конечные результаты.

Сущность *программного подхода* состоит в том, что в роли ведущего звена планирования выступает программа как особая форма концентрации усилий и ресурсов на решении важнейших задач типового периода.

Для *программно-целевого метода* планирования и управления разработками систем характерным является сквозное планирование и управление процессом выполнения совокупности взаимосвязанных работ, направленных на создание образца новой техники, начиная с проработки замысла и кончая серийным производством и эксплуатацией. Сквозное планирование, т.е. планирование с учетом всего жизненного цикла образца техники, строгое определение в программе последовательности намеченных мероприятий и эшелонирование ресурсов во времени обеспечивают реальность плана и позволяют сократить реализационный период образца новой техники.

К элементам программно-целевого метода планирования и управления относится также широкое использование технико-экономического оценивания образцов новой техники по критерию «затраты – эффект», что обеспечивает максимальную эффективность использования ресурсов, выделяемых на развитие науки и техники.

Всей работе по программному планированию в области военного дела предшествует оперативное обоснование задач, стоящих перед вооруженными силами и их видами на программный период. В основе оперативного обоснования задач лежит анализ состояния и прогноз развития вооруженных сил противника, анализ состояния вооружения и военной техники своих войск, прогресс науки и техники, военная политика правительства своей страны и правительств государств вероятных противников.

Реализация комплексных программ создания и внедрения новой техники требует соответствующего методического, информационного и математического обеспечения управления разработками, внедрения в практику разработок принципов системных исследований.

Создание образцов новой техники ориентируется на прогнозируемые потребности в ней в условиях изменения внешней среды. Система и среда находятся в состоянии взаимного влияния, причем среда проявляется в различных аспектах и, соответственно, различным образом влияет на эффективность применения системы. Рассмотрение среды как системы со своими целями и законами функционирования имеет принципиальное значение при исследовании тенденций развития взаимодействующих систем. Наиболее сложным является оценивание развития систем в ус-

ловиях противоборства, когда среда выступает в качестве противодействующей системы. Поэтому важным вопросом в методологическом плане является вопрос управления развитием систем в условиях конфликтного взаимодействия. Здесь необходимо применение математической теории конфликта, теории управления эффективностью применения систем в конфликтных ситуациях с учетом прогнозируемого развития противоборствующей стороны.

При разработке сложных систем оценивание и контроль предлагаемых проектов должны производиться по ряду направлений и характеристик, к которым, в первую очередь, относятся: обоснование потребности в новой системе; сроки разработки системы; стоимость жизненного цикла; технический риск; возможность дальнейшего совершенствования системы; ожидаемая эффективность применения системы. Для этого разрабатываются методики оценивания систем в процессе их создания, которые предусматривают отражение следующих положений:

1. Определение целей и задач, для достижения и решения которых требуется создать систему или комплекс систем, т.е. построение «дерева целей».

2. Описание ситуаций, в которых предполагается применение разрабатываемой системы.

3. Нормирование исходных данных или предварительных требований к системе, включая как требования к характеристикам системы, так и требования по стоимости и времени ее реализации.

4. Разработка и исследование вариантов системы, которые ориентированы на использование как уже апробированных технических решений, так и дальнейшее усовершенствование систем на базе накопленного опыта эксплуатации и новых технических решений. С целью уменьшения стоимости жизненного цикла и времени разработки, а также с целью увеличения времени эффективной жизни систем широко используются унификация и стандартизация элементов на различных системных уровнях и проектируются системы с определенным функциональным резервом, ориентированным на изменяющиеся условия их применения.

Круг разрабатываемых альтернатив на стадиях научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ должен быть достаточно широк с тем, чтобы можно было выбрать оптимальный в некотором смысле вариант. Предварительное оценивание и отбор альтернатив производится, исходя как из обеспечения требований к степени выполнения поставленных задач, так и технико-экономических возможностей реализации системы в заданные сроки.

5. Анализ эффективности применения, стоимости и продолжительности жизненного цикла разрабатываемой системы. Здесь основная задача заключается в обосновании и выборе показателей эффективности, которые должны выражать степень достижения цели и позволять сравнивать варианты системы по конечному результату их применения в предполагаемых ситуациях. При оценивании качества системы необходимо учитывать совместимость разрабатываемых средств с другими системами, уже имеющимися в эксплуатации, а также возможность их дальнейшего усовершенствования.

На этом этапе важное значение приобретают методы и модели анализа эффективности, разработка которых должна вестись на основе системного подхода и

обеспечивать определение как качественных, так и количественных показателей по всей совокупности исследуемых ситуаций, их взаимосвязи и получаемого эффекта.

Для прогнозирования стоимости и продолжительности жизненного цикла системы строятся модели, в которых эти характеристики рассматриваются как функции от технических характеристик разрабатываемой системы.

6. Выбор оптимального варианта системы по показателям эффект–стоимость–время. На этом этапе необходимы комплексные математические модели, обеспечивающие реализацию процесса оптимизации. Определенность и точность решения задачи выбора в значительной степени зависят от определенности и точности показателей, характеризующих сравниваемые варианты. Проводимый при этом многоуровневый анализ предполагает наличие как частных (локальных) показателей оценивания подсистем и элементов, так и общего показателя оценивания системы в целом. Важно, чтобы эти показатели были согласованы между собой, чтобы обеспечивалась приоритетность показателей по уровням оценивания и их информационная обеспеченность. С другой стороны, совокупность показателей должна учитывать развертывание процесса создания системы во времени. Такое многоуровневое и поэтапное оценивание дает возможность осуществить процесс непрерывного оценивания, обеспечивая при этом учет всех аспектов и установление оптимальных сроков разработки системы, ее изготовления и внедрения в эксплуатацию.

Реализация указанных принципов исследования и оценивания систем требует разработки специального системного математического обеспечения процесса управления научно-техническим уровнем создаваемых систем. Оно призвано обеспечить:

- сбор и обработку информации;

- изучение процессов функционирования и взаимодействия систем в условиях развивающейся среды;

- прогнозирование тенденций развития систем и среды, в которой они функционируют;

- получение обоснованных и своевременных оценок качества и эффективности применения систем;

- обработку и выдачу результатов исследований;

- диалоговый режим с пользователем.

Необходимость создания специального системного математического обеспечения обусловливается тем, что для осуществления многоуровневого и многоцелевого процесса принятия решений на всех стадиях жизненного цикла систем требуются объективные, количественно обоснованные и своевременные оценки качества систем, которые позволяют с наименьшими затратами реализовать поставленные цели.

Для повышения качества проработки систем и гарантий успешной реализации их создания в условиях неопределенности при возрастании напряженности сроков их разработки и изготовления с ранних этапов проектирования необходимо иметь адекватные решаемым задачам модели систем. В совокупности они должны образовывать банк моделей с разной степенью детализации описания исследуемых объектов и входить составной частью в имитационную систему с соответствующей информационной основой в виде базы пополняемых данных и базы знаний. Имитационная система должна обеспечивать решение задач автоматизированного мно-

говариантного анализа проектируемых систем и подготовки решений по конкурентоспособным вариантам, предлагаемым для дальнейшей проработки и выявления оптимального варианта.

2.4. Тактико-техничко-экономическое обоснование развития систем ВВТ

Одним из основных принципов строительства Вооруженных Сил является плановый подход к развитию вооружения и военной техники. Он предусматривает постоянное и своевременное обновление вооружения и военной техники с учетом последних достижений науки и техники, новейших и перспективных средств нападения противника, а также современных требований к обеспечению эффективной обороны страны.

По своему характеру военно-научные исследования по обоснованию перспектив развития вооружения и военной техники являются системными. Один из возможных вариантов их проведения может быть представлен тремя основными этапами.

На *первом этапе* разрабатываются исходные положения и установки, необходимые для обоснования перспектив развития вооружения и военной техники. Для этого сначала определяются прогнозируемые военные ситуации, в которых возможно применение вооружения и военной техники. Применительно к противовоздушной обороне дается военно-технический прогноз развития средств воздушного нападения противника, описывается замысел и возможная организация его воздушных наступательных операций. Далее изучается вся система объектов ПВО и выявляются задачи их защиты. Затем уточняется исходное состояние системы ПВО, от которого начинаются работы по совершенствованию самой системы и вооружения. Наконец устанавливаются ресурсные ограничения по ассигнованиям, возможностям промышленности и численности личного состава.

На *втором этапе* разрабатывается общий исходный перечень образцов вооружения. Для этого составляется каталог типовых ситуаций воздушной обстановки, формулируются задачи сил и средств ПВО и оперативно-тактические требования к перспективным образцам вооружения. После этого определяется общий замысел построения и организации системы ПВО на прогнозируемый период и дается общий исходный перечень перспективных образцов вооружения, который должен быть исследован и оценен в процессе системного тактико-техничко-экономического обоснования вооружения.

На *третьем этапе* непосредственно проводится системное обоснование вооружения. При обосновании всей системы вооружения его тактико-техничко-экономическое оценивание осуществляется на нескольких уровнях. Сначала на своем уровне анализируется и получает полную оценку каждый образец вооружения. Далее выясняется вклад образца в эффективность действий частей (группировок средств), соединений и объединений. Анализ по отдельным образцам и группировкам средств доводится до оценивания вклада вооружения в единую систему.

На базе исследований предварительно определяется технический облик новых образцов, оцениваются сроки их технической реализации и производится отбор образцов, которые могут быть рекомендованы к разработке. Результаты системного

тактико-технико-экономического обоснования реализуются в основных направлениях развития и программах вооружения, планах НИР и ОКР, а также в оперативных разработках по формам ведения военных действий. Основные направления развития определяют необходимый технический уровень перспективного вооружения и важнейшие военно-технические проблемы, решение которых должно обеспечить дальнейшее развитие и совершенствование вооружения и военной техники.

Основным методическим аппаратом, применяемым при планировании развития и разработке вооружения и военной техники, является аппарат их системного тактико-технико-экономического обоснования и анализа.

Тактико-технико-экономическое обоснование – это процесс разработки и оформления документа, содержащего анализ условий боевого применения комплекса (образца) военной техники, решаемых им задач и его экономическую оценку по сравнению с существующими отечественными и зарубежными комплексами (образцами) в условиях применения противником средств противодействия.

Тактико-технико-экономическому обоснованию подвергаются тактико-технические характеристики (ТТХ) и способы боевого применения образцов вооружения и военной техники, подлежащих разработке, а также важнейшие организационно-технические мероприятия, которые предстоит выполнить на различных стадиях жизненного цикла образцов вооружения и военной техники. ТТХ – упорядоченная по определенному замыслу совокупность количественных и качественных характеристик образца военной техники, определяющих его свойства (боевые возможности).

Основным элементом тактико-технико-экономического обоснования вооружения и военной техники является тактико-технико-экономический анализ. Он состоит в комплексном оценивании боевых, технических и эксплуатационных свойств (возможностей) военной техники, а также затрат, необходимых для ее создания и обеспечения функционирования. Тактико-технико-экономический анализ осуществляется с применением критерия «эффективность–стоимость», сущность которого заключается в сопоставлении достигнутого боевого эффекта (целевого эффекта) и необходимых для этого затрат с учетом стоимости разработки, серийного производства, эксплуатации и капитального ремонта военной техники.

Назначением трех взаимосвязанных составных частей тактико-технико-экономического анализа вооружения и военной техники является выполнение следующих основных процедур.

При тактическом анализе доказываемость необходимости образца, определяется его роль в решении сформулированных задач обороны страны, оценивается эффективность применения образца по назначению, его полезность. Также анализируются области и способы применения образца.

Технический анализ должен показать, какой выигрыш по величине технических параметров получается за счет предлагаемых или принятых технических решений. Чтобы технически оценить образец надо определить, в какой мере прогрессивен принцип, положенный в основу конструкции и схемных решений образца, и насколько конструктивные, схемные и технологические свойства его отвечают современным требованиям науки и техники. Для этого необходимо оценить научно-технический уровень принятых технических решений, сопоставить его с соответ-

ствующим уровнем научно-технического прогресса. Для разрабатываемого образца дается сравнение технических параметров с параметрами аналога. В качестве последнего выбирают лучший прототип, аналогичный по области применения разрабатываемому образцу.

Если техническая целесообразность нового образца доказана, т.е. проектируемый образец по своим основным техническим параметрам находится на уровне современных достижений научно-технического прогресса, то приступают к определению его экономической эффективности.

В ходе *экономического анализа* выясняют, какими затратами будет достигнута требуемая боевая эффективность, оценивают целесообразность этих затрат и затрат на эксплуатацию образца, сравнивают по экономическим показателям различные варианты построения образца. Более широким понятием по сравнению с понятием тактико-технического анализа вооружения и военной техники является понятие военно-экономического анализа.

Военно-экономический анализ как научное направление представляет собой систему специальных знаний, связанную с вопросами рационального распределения и эффективного использования ресурсов, выделяемых на оборону страны. Его основная цель состоит в подготовке рекомендаций по способам получения наилучших результатов при использовании выделенных ресурсов или в достижении заданных результатов при минимуме затрат. Военно-экономический анализ вырабатывает методы количественного анализа и обоснования военно-экономических решений и предполагает совместное проведение тактического, технического и экономического анализа. Он широко используется для обоснования перспектив развития и ТТХ образцов вооружения и военной техники, решая задачу их тактико-технико-экономического анализа.

К числу важнейших содержательных задач, решаемых методами военно-экономического анализа, относятся:

- экономическое обоснование перспектив развития вооружения и военной техники;
- анализ реализуемости перспективных планов развития вооружения и военной техники с учетом возможностей промышленности;

- обоснование планов проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выполняемых с целью создания новых образцов вооружения и военной техники;

- обоснование военно-экономической целесообразности усовершенствования образцов вооружения и военной техники;

- определение экономической эффективности образцов вооружения и организационно-технических решений, принимаемых при их разработке, изготовлении и эксплуатации;

- обоснование нормативов запасов товарно-материальных ценностей;

- определение экономической эффективности использования трудовых, материальных и финансовых ресурсов в области обороны страны;

- выявление и измерение внутренних резервов на всех стадиях производственного процесса при изготовлении вооружения и военной техники;

объективное и всестороннее исследование выполнения планов соблюдения нормативов;

контроль за осуществлением требований хозяйственного расчета оптимизация систем ремонта военной техники и другие задачи.

В любой из перечисленных задач просматривается определенная цель анализа. Для их решения необходима система методов разного уровня общности и методик, позволяющих находить наилучшие способы достижения поставленной цели.

Военно-экономический анализ как процесс обоснования военно-экономических решений представляет собой систему целенаправленных действий, реализуемых в ходе взаимной деятельности логически взаимосвязанных этапов, включавшей:

формирование цели исследуемого организационно-технического мероприятия или определение назначения разрабатываемого образца (целевые исследования);

разработка альтернативных способов и средств достижения цели, из которых необходимо сделать выбор наиболее предпочтительных (операционные исследования);

выявление потребных ресурсов на реализацию исследуемых альтернатив и ограничений (ресурсные исследования);

анализ взаимодействия цели, альтернатив и ресурсов; выбор показателя оценивания и формирования ограничений, определяющих область допустимых решений, установление логики выбора альтернатив и обоснование критерия выбора (критериальные исследования); сравнение альтернатив по выбранному показателю, включая оптимизацию решения {оптимизационные исследования}; анализ решений (т.е. анализ возможных последствий принимаемых решений) и принятие решения о выборе предпочтительного варианта.

Методическим аппаратом, адекватным задаче военно-экономического анализа в указанной выше постановке, является аппарат теории решений, исследуемой модели процессов принятия решений и их свойства.

Важнейшими понятиями, которыми оперирует военно-экономический анализ, являются понятия качества и эффективности объектов анализа. С обоснованием и принятием военно-экономических решений непосредственно связано рассмотрение показателей и критериев оценивания качества и эффективности.

Методический аппарат военно-экономического анализа состоит как из методов, характерных только для него самого, так и из методов, применяемых другими научными направлениями, конкретными военно-экономическими и специальными дисциплинами. Основываясь на всеобщем диалектическом методе, военно-экономический анализ широко использует общенаучные и специальные методы частных наук, исследовательские подходы (методы-подходы), определявшие направление и общий характер исследований, и методы-приемы, вооружающие конкретными приемами исследований.

Военно-экономический анализ опирается на понятия и методы теории военной экономики и военной науки в целом, системного анализа, теории эффективности и исследования операций, математического моделирования, программно-целевого планирования. Он использует методы оптимизации, научно-технического и экономического прогнозирования, теории решений, экономико-статистические методы и модели, аппарат сетевого планирования и управления и т.п.

3. РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВООРУЖЕНИЕМ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКОЙ

3.1. Особенности радиоэлектронных систем ВВТ

В настоящее время непрерывно растет число вновь создаваемых сложных автоматизированных систем управления боевыми действиями войск. Это объясняется насущными потребностями, возникшими вследствие значительных трудностей осуществления процесса управления войсками и оружием и увеличения масштабов предприятий военно-промышленного комплекса и достижениями в области автоматизации и вычислительной техники.

Увеличение сложности задач управления боевыми действиями в современных условиях можно проследить на росте номенклатуры выпускаемых за последние годы изделий вооружения и военной техники, увеличении в среднем их конструктивной сложности и резком повышении технологического уровня производства. Такое положение значительно усложняет решение задач прогнозирования, планирования и оперативного управления процессами боевого управления в отдельных видах и родах войск и, особенно, в вооруженных силах в целом.

Появление быстродействующих ЭВМ, бурное развитие телекоммуникационных технологий и значительные успехи в вопросах автоматизации планирования войсковых операций, динамического управления боем позволяют решение указанных задач перевести на более высокий уровень на основе использования последних достижений в области теории и, в частности, в области исследования операций и применения математических методов в интересах решения задач военного управления.

Наиболее характерные особенности сложных радиоэлектронных систем – это наличие большого числа разнородных элементов, объединенных в систему для достижения единой цели, сложные взаимно переплетающиеся связи, развитая система математического обеспечения, предназначенная для обработки огромных информационных потоков в реальном времени. Достижение системой единой цели в соответствии с ее назначением обеспечивается решением совокупности конкретных задач отдельными элементами системы или ее подсистемами.

Особенностью сложных радиоэлектронных систем является также наличие специального математического обеспечения (больших комплексов программно-реализованных алгоритмов), предназначенного для обработки и преобразования потоков информации, выработки решения и осуществления функций управления. Специальное математическое обеспечение представляет собой самостоятельный функциональный элемент сложной системы, лишенный конкретного физического воплощения в виде приборов и материализованных устройств. Последнее обстоятельство иногда приводит к неверному выводу о том, что программно-реализованный ком-

плекс алгоритмов не может рассматриваться как отдельный элемент системы и является лишь дополнением к аппаратным средствам вычислительного комплекса.

Сложные системы характеризуются множеством состояний. Каждое состояние определяется конкретным набором выходных параметров. Изменение входного воздействия или значений параметров, характеризующих поведение отдельных элементов системы в соответствии с установленными функциональными зависимостями, приводят к изменению выходных параметров системы и ее состояния. Последнее наряду с различными параметрами, характеризующими каждый из элементов и систему в целом, а также наличие сложных функциональных зависимостей между ними, в значительной мере затрудняет формализацию с целью описания процесса поведения таких систем. На практике редко удается получить полное математическое описание поведения сложной системы в общем виде, поэтому чаще стараются использовать методы имитации изучаемой системы.

Сложные системы можно разбить на подсистемы и элементы с иерархической структурой связей. Каждая подсистема, решая конкретную задачу, обеспечивает тем самым достижение общей цели. Таким образом, в понятие сложной системы вкладывается следующий смысл:

сложную систему можно расчленить на конечное число подсистем, а каждую подсистему, в свою очередь – на конечное число более простых подсистем и т.д. до тех пор, пока не получим элементы системы (под элементами системы будем понимать объекты, которые в условиях данной задачи не подлежат расчленению на части);

элементы сложной системы функционируют во взаимодействии друг с другом;

свойства сложной системы определяются не только свойствами отдельных элементов, но и характером взаимодействия между элементами.

Примерами сложной системы военного назначения могут служить распространенные в настоящее время различные виды автоматизированных систем, предназначенных для совершенствования организации и управления процессами обработки информационных потоков о противнике, состоянии своих сил и средств, поддержки принятия решения командира на ведения боевых действий.

По характеру самого объекта управления, форме передачи информации, степени используемой автоматизации рассматриваемые сложные системы в первом приближении можно разделить на три класса:

- 1) автоматизированные системы управления оружием;
- 2) автоматизированные системы управления тактическими соединениями, объединениями или родом войск в целом;
- 3) автоматизированные информационно-расчетные системы.

В автоматизированных системах управления оружием в качестве объекта управления обычно рассматриваются комплексы средств поражения, приборы, устройства. Процесс управления построен на обработке разнообразной по своей природе сигнальной информации с последующей выработкой команд управления. В частных случаях процесс управления может быть полностью автоматическим. Основная задача этих систем – оптимизация управления сложными процессами подготовки оружия к применению, целеуказания и наведения на воздушные и наземные цели, характеризующееся большим числом управляемых параметров. В на-

стоящее время успешно функционируют полностью автоматические системы, управляющие оружием.

В автоматизированных системах, предназначенных для решения планирования и управления боевыми действиями тактических соединений, объединений в качестве объекта управления рассматриваются как сама система боевого управления, так и подчиненные подразделения. Система вырабатывает решения, обеспечивающие наилучшее достижение поставленной цели за счет оптимального функционирования объекта управления. К подобным системам относят, например, автоматизированные комплексы и системы управления командных пунктов иерархической структуры противовоздушной обороны или автоматизированные системы управления боевыми действиями полков, дивизий и армий военно-воздушных сил, предназначенные для решения комплекса задач сбора и обработки разведывательной информации о противнике, данных о боевой готовности своих сил и средств, планирования боевых действий бомбардировочных, штурмовых и разведывательных авиационных полков, планирования и организации материально-технического обеспечения боевых действий; осуществления контроля и учета результатов наносимых ударов и т. д.

В состав автоматизированных систем управления (АСУ) входят сложные вычислительные комплексы (ВК) подчиненных комплексов средств автоматизации, объединенные между собой линиями передачи данных с соответствующей аппаратурой приема, передачи, ввода и вывода необходимого потока информации.

Автоматизированные информационно-расчетные системы можно рассматривать как часть автоматизированной системы управления войсками и оружием. Они обеспечивают сбор, хранение, упорядочение и обработку больших массивов справочной информации. В ряде случаев такие системы имеют и самостоятельное значение. Их создают при больших автоматизированных системах управления для обеспечения поддержки принятия решения командиром на основе прогнозирования развития оперативно-тактической обстановки и моделирования вариантов ведения боевых действий, упорядочения процесса хранения и оперативного поиска необходимой справочной информации. В зависимости от организации вычислительного процесса, массивов информации и процессов ее обработки различают информационно-расчетные системы реального и нереального времени.

Быстрое развитие и усложнение техники, увеличение масштабов и стоимостей проводимых мероприятий при создании новых систем, широкое внедрение автоматизации в сферу управления – все это привело к необходимости введения понятия сложной системы целенаправленного поведения и формулирования научного подхода к исследованию таких систем на новой методологической основе. Для этого необходимо провести анализ основных особенностей сложной системы.

В настоящее время не существует достаточно общего определения сложной системы. Поэтому исследователи в зависимости от типа объекта исследования вводили то или иное понятие сложной системы, которое обычно справедливо для одного объекта, но не всегда справедливо для другого.

Для сложных систем присущи следующие общие факторы:

- наличие большого числа взаимосвязанных и взаимодействующих элементов (подсистем);

осуществление взаимодействия элементов в системе;

многомерность системы, обуславливаемая множеством сложных взаимопересекающихся связей между подсистемами, их неоднородностью и разномасштабностью;

многообразии структуры, обуславливаемое как разнообразием структур элементов (подсистем), так и разнообразием структур объединения элементов (подсистем) в единую систему;

многообразие природы элементов (подсистем), которое характеризуется их различной физической сущностью;

наличие развитой системы программного обеспечения (больших комплексов программно-реализованных алгоритмов), предназначенной для обработки и преобразования огромных информационных потоков, выработки решения и осуществления функций управления. Специальное программно-математическое обеспечение представляет собой относительно самостоятельный функциональный компонент сложной системы;

многорежимный характер функционирования с выполнением сложной функции или ряд функций;

существование у системы общей цели, общего назначения, определяющего единство сложности, несмотря на все разнообразие входящих в нее элементов;

иерархический характер управления;

разнообразие состояний системы, элементов (подсистем) и случайной природой их свойств;

невозможность предсказания поведения системы и элементов без специального анализа, вычислений и т.п., т.е. слабопредсказуемость и скрытность их свойств и поведения;

многокритериальность, обуславливаемая разнообразием целей отдельных элементов (подсистем), входящих в сложную систему, а также разнообразие требований, предъявляемых к исследуемой системе со стороны других систем.

Достижение системой единой цели в соответствии с ее назначением обеспечивается решением совокупности конкретных задач отдельными элементами системы и ее подсистемами. В сложной системе, как правило, все ее подсистемы сами являются сложными системами.

Сложность системы характеризуется не просто увеличением размерности, но и многокритериальностью, иерархичностью структуры, наличием подсистем различной природы. Сложность системы – понятие многогранное, поэтому в различных проблемах проявляются различные аспекты сложности. Выделяют структурную сложность, динамическую сложность, вычислительную сложность и т.д. Сложность – понятие качественное, нечеткое, не имеющее строгого определения и общепринятого способа количественного оценивания. Обычно применяют словесное (или вербальное) описание сложности.

Большой системой называют систему, не наблюдаемую одновременно с позиций одного наблюдателя во времени или в пространстве, для которой существует пространственный фактор, число подсистем которой очень велико, а состав разно-

роден. Система может быть и большой и сложной. Сложные системы объединяют более обширную группу систем, чем большие системы, т.е. последние являются, подклассом сложных систем.

Одно из наиболее общих свойств большой системы заключается в невозможности ее восприятия (обозримости) некоторым наблюдателем (инженером, исследователем, разработчиком, испытателем и т.д.).

Одним из видов сложных систем является организация. *Организация*, являясь целостным, системным образованием, обладает свойством *устойчивости*, т. е. всегда стремится восстановить нарушаемое равновесие, компенсируя возникающие под влиянием внешних факторов изменения.

Самоорганизующиеся или *развивающиеся* системы характеризуются рядом признаков, особенностей, приближающих их к реальным развивающимся объектам. Эти особенности, как правило, обусловлены наличием в системе активных элементов и носят двойственный характер: они являются новыми свойствами, полезными для существования системы, приспособляемости ее к изменяющимся условиям среды, но в то же время, вызывают неопределенность, затрудняют управление системой.

Основными свойствами самоорганизующихся систем являются:

1) нестационарность (изменчивость, нестабильность) отдельных параметров и стохастичность поведения;

2) уникальность и непредсказуемость поведения системы в конкретных условиях (из-за наличия в системе активных элементов у системы как бы проявляется «свобода воли», но в то же время имеет место и наличие предельных возможностей, определяемых имеющимися ресурсами (элементами, их свойствами) и характерными для определенного типа систем структурными связями;

3) способность адаптироваться к изменяющимся условиям среды и помехам (причем как к внешним, так и к внутренним) – является полезным свойством, однако адаптивность может проявляться не только по отношению к помехам, но и по отношению к управляющим воздействиям, что весьма затрудняет управление системой;

4) принципиальная неравновесность (стремление развивающихся объектов к нахождению в неустойчивом, неравновесном состоянии);

5) способность противостоять энтропийным (разрушающим) систему тенденциям и проявлять неэнтропийные тенденции (обусловлена наличием активных элементов, стимулирующих обмен материальными, энергетическими и инфомационными продуктами со средой и проявляющих собственные «инициативы», благодаря чему в таких системах нарушается закономерность возрастания энтропии и проявляются неэнтропийные тенденции, т.е. собственно самоорганизация, развитие, в том числе «свобода воли»;

6) способность вырабатывать варианты поведения и изменять свою структуру, выходить на новый уровень эквивалентности, сохраняя при этом целостность и основные свойства;

7) способность и стремление к целеобразованию (формирование цели внутри системы);

8) неоднозначность использования понятий (например, «цель» – «средство», «система» – «подсистема») – проявляется при формировании структур целей, при разработке проектов сложных автоматизированных комплексов, когда лица, формирующие структуру системы, назвав какую-то ее часть подсистемой, через некоторое время начинают говорить о ней, как о системе или подцели, называя средствами достижения вышестоящих целей.

Рассмотренные особенности противоречивы. Они в большинстве случаев являются и положительными и отрицательными, желательными и нежелательными для создаваемой системы.

Противоречивые особенности развивающихся систем и объясняющие их закономерности в реальных объектах необходимо изучать, постоянно контролировать, отражать в моделях и искать методы и средства, позволяющие регулировать степень их проявления.

При этом следует иметь в виду важное отличие открытых развивающихся систем с активными элементами от закрытых систем: пытаюсь понять принципиальные особенности моделирования таких систем, уже первые исследователи отмечали, что начиная с некоторого уровня сложности систему легче изготовить и ввести в действие, преобразовать и изменить, чем отобразить формальной моделью.

Компоненты сложной системы могут рассматриваться как подсистемы, каждая из которых может считаться состоящей из более простых подсистем и т.д. до тех пор, пока не будут получены элементы, т.е. такие компоненты, которые не подлежат расчленению в условиях данной задачи.

Сложную систему в общем случае можно подразделить на следующие основные функциональные подсистемы:

1) решающую, которая принимает глобальное решение о взаимодействии с внешней средой и распределяет локальные задания всем другим подсистемам для его реализации;

2) информационную, обеспечивающую сбор, переработку и передачу информации, необходимой для принятия глобального решения и выполнения локальных заданий;

3) управляющую, предназначенную для реализации глобального решения;

4) гомеостазную, поддерживающую динамическое равновесие внутри среды и регулирующую потоки и ресурсы энергии и вещества в подсистемах, необходимые для выполнения их локальных заданий (способность системы сохранять относительное постоянство, относительную устойчивость, замкнутость, способность длительно функционировать без существенного снижения эффективности);

5) адаптивную, накапливающую опыт в процессе обучения для улучшения структуры и функций системы.

Основополагающими при анализе и синтезе больших и сложных систем являются понятия декомпозиции и агрегирования. Декомпозиция определяет подход к исследованию систем, приводя к упрощенному описанию. В буквальном смысле декомпозиция представляет собой разъединение системы на части с последовательным самостоятельным рассмотрением отдельных частей.

Декомпозиция представляет собой понятие, связанное с моделью система, так как сама система вследствие своей целостности не может быть расчленена без на-

рушения ее свойств. На уровне моделирования разрозненные связи заменяются соответствующими эквивалентами либо модель системы строится так, что разложение на отдельные части при этом оказывается естественным переходом к большим и сложным системам. Декомпозиция является мощным и практически единственным инструментом для их исследования. Расчленение системы на подсистемы в настоящее время не формализовано и носит эвристический характер в зависимости от целей исследования сложной системы. Например, при построении автоматизированных систем управления, которые являются типичным примером сложной системы, выделение подсистем часто производят по функциональным признакам и признакам обеспечения ресурсами функциональных процессов и управления. Возможно также выделение подсистем по видам объектов управления, входящих в состав сложной системы: иногда подсистемам ставят в соответствие задачи, решение которых необходимо осуществить для выполнения основной задачи, поставленной перед создаваемой сложной системой. Разбиение сложной системы на подсистемы целесообразно производить таким образом, чтобы они представляли собой самостоятельно функционирующие части системы, решающие свои задачи управления, т. е. обладающие правом самостоятельного принятия решения.

Агрегирование систем является понятием, противоположным декомпозиции. В процессе анализа и особенно синтеза возникает необходимость объединения элементов системы с целью рассмотрения системы с более общих позиций. Декомпозиция и агрегирование представляют собой две противоположные стороны подхода к рассмотрению больших и сложных систем, проявлявшиеся в диалектическом единстве.

Иерархическое построение – характерный признак сложных систем. При этом уровни иерархии могут быть как однородными, так и неоднородными. Особым видом сложных систем является иерархическая система, обладающая рядом особенностей ее функционирования, которые необходимо учитывать при ее исследовании и испытании, а именно:

1) наличие приоритета в принятии решения между подсистемами, входящими в состав исследуемой сложной системы;

2) расположение подсистем с явно выраженными локальными свойствами по уровням иерархии в соответствии с приоритетом принимаемых ими решений, причем подсистемы одного уровня по отношению друг к другу обладают одинаковым приоритетом в выборе решений;

3) решение каждой из подсистем (кроме подсистем первого уровня) двух задач по своим локальным критериям оптимальности: задачи самоуправления и задачи координации подчиненными ей подсистемами нижнего уровня, осуществление связи подсистем нижнего уровня с подсистемами верхних по отношению к ним уровней путем передачи предварительно обобщенной информации;

4) осуществление связи подсистем верхних уровней с подчиненными им подсистемами нижнего уровня через управляющие воздействия, выдаваемые подсистемами верхних уровней;

5) осуществление связи между подсистемами одного уровня как непосредственно через выходные переменные, описывающие их состояние, так и через управ-

ляющие воздействия, вырабатываемые при решении задачи координации в подсистеме верхнего уровня;

6) построение модели задач координации в каждой из подсистем, кроме подсистем первого уровня, по обобщенной информации о поведении всей совокупности подчиненных ей систем нижних уровней;

7) формирование параметров задач координации при решении задач самоуправления в каждой из подсистем;

8) существование тактов в решении задач самоуправления и координации в каждой из подсистем и связанных с этим тактов выдачи как обобщенной информации, так и управляющих воздействий;

9) большую длительность периодов решения задач в подсистемах верхних уровней, чем в нижних;

10) наличие права для подсистем нижних уровней между двумя соседними тактами решения задачи координации в подсистеме верхнего уровня принимать самостоятельное решение при заданном с верхнего уровня управляющем воздействии;

11) действие на каждую подсистему как локальных внешних возмущений, так и внутренних, связанных с изменением обобщенной информации нижних уровней.

Основное отличие (первое) систем централизованного и децентрализованного управления связано с иерархичностью структуры системы управления. Она состоит в том, что для систем с централизованным управлением существует единая целевая функция для всей системы в целом, а для систем с децентрализованным управлением каждая из подсистем, входящих в ее состав, имеет свои локальные целевые функции. В этом случае, даже если вся иерархическая система в целом функционирует для достижения какой-либо одной цели, отдельные подсистемы могут не достигать оптимальных значений своих локальных целевых функций. Это означает, что локальные цели подсистем вовсе не обязательно должны быть согласованы с целью всей системы. Такие системы являются сугубо многокритериальными и в отличие от систем с централизованным управлением (где можно четко определить, что понимается под оптимальным их поведением) для иерархических систем понятие оптимального поведения требует дополнительного уточнения, связанного с доопределением принципов взаимодействия подсистем. Второе отличие состоит в том, что для централизованных систем управление выбирается для всей системы одновременно (на одном и том же промежутке времени), а для иерархических систем выбор управляющих воздействий в подсистемах осуществляется последовательно (каждая подсистема обладает правом автономного функционирования). Эти особенности иерархических систем порождают трудности, связанные со сложностью анализа поведения и управления такими системами.

В иерархической структуре системы с обработкой информации на промежуточных уровнях (децентрализацией обработки) совершенно неизбежна и децентрализация управления. Это вызывается следующими обстоятельствами.

Во-первых, информация об обстановке в зоне наблюдения элемента низкого уровня, вследствие обработки и обобщения на промежуточных уровнях, доходит до элемента информационной системы, находящегося на достаточно высоком иерархическом уровне в значительно урезанном виде (часть информации теряется).

Во-вторых, даже при минимальных потерях информации для передачи всех необходимых сведений и их хранения на элементе высшего уровня (управляющем элементе) требуется трудно реализуемая производительность вычислительных средств и средств передачи данных.

В-третьих, при выработке управляющего решения, предназначенного для какого-либо из исполнительных (управляемых) элементов, необходимо учитывать условия наблюдения и характер взаимодействия этого элемента со своими потребителями, т.е. характеристики, определяемые непосредственно по месту исполнения принятого решения и задаваемые большим числом параметров. Так как управляющий элемент принимает решения для целого ряда исполнительных элементов, расположенных на разных уровнях иерархии, он должен иметь всю необходимую для принятия решений информацию относительно всех управляемых элементов, причем эта информация должна быть достаточно «свежей».

В-четвертых, передача информации, выбор управляющей стратегии и передача управляющего воздействия на исполнительные элементы занимают определенное время. В результате при централизованном управлении с высокого уровня, на низком уровне алгоритм управления вынужден пользоваться устаревшей и неполной информацией, так что качество решения может оказаться хуже возможного. Кроме того, это решение поступает к исполнительному элементу (подсистеме) с опозданием, когда ситуация уже изменилась. В этом случае управление становится малоэффективным.

Таким образом, каждый элемент системы, производящий обработку информации, независимо от занимаемого иерархического уровня, должен иметь собственный алгоритм управления.

Необходимость применения иерархической структуры при построении систем управления сложными системами, кроме того, обусловлена следующими факторами:

достаточно сложные системы, состоящие из объектов различной природы, большой размерности, различной инерционности, не смогут функционировать без разделения функций принятия решений, т.е. без введения иерархической структуры. Размерность системы в целом при централизованном управлении будет такова, что даже вычислительная схема декомпозиции при выборе управления может оказаться неприемлемой;

в иерархических системах действие внешних возмущений на отдельные подсистемы устраняется самостоятельно и может не затрагивать другие подсистемы. Это увеличивает адаптацию системы и позволяет сократить затраты времени и средств на управление;

иерархическая система обладает повышенной надежностью, так как выход из строя системы управления отдельной подсистемы обычно не приводит к выходу из строя всей системы в целом. Кроме того, централизованное управление предъявляет повышенные требования к точности информации, так как искажение информации по одной из управляемых переменных может привести к ошибочному решению для всей системы в целом. Требование надежности централизованной системы управления приводит к возрастанию стоимости и времени выработки управляющих воздействий;

период выработки управляющего воздействия в централизованных системах определяется подсистемой, обладающей наименьшей постоянной времени, т.е. наименее инерционной, в то время как другие подсистемы допускают управление с большими периодами в силу своей большей инерционности. Иерархическая структура учитывает инерционность отдельных подсистем, что приводит к различной периодичности при выборе управляющих воздействий на разных уровнях и к автономному функционированию подсистем на некоторых промежутках времени.

Иерархическая структура управления допускает описание подсистем с учетом различных аспектов, т.е. допускает их описание на различных уровнях абстракции. Централизованная система управления требует, чтобы все подсистемы, входящие в ее состав, описывались на одном языке.

3.2. Критерии эффективности радиоэлектронных систем управления ВВТ

Как показала практика, внедрение АСУ приводит к значительному повышению эффективности ведения боевых действий за счет рационального распределения материальных и людских ресурсов и выбора оптимального варианта боевого применения имеющихся в распоряжении командира сил и средств. Оценка эффективности созданной сложной системы относится к весьма трудным задачам, так как связана с выбором критерия эффективности, который должен отразить сложную взаимозависимость многочисленных факторов, влияющих на функционирование системы. Поскольку функционирование сложной системы протекает, как правило, в условиях значительного влияния внешних случайных факторов, то оценку ее эффективности целесообразно проводить с помощью различных вероятностных характеристик.

Эффективность системы характеризует степень приспособленности системы к решению стоящих перед ней задач, поэтому конкретный вид показателя эффективности зависит, прежде всего, от назначения системы, ее целевой функции. Существует несколько требований и условий, которыми следует руководствоваться при выборе показателя эффективности:

- 1) показатель эффективности должен характеризовать не какую-то часть системы или отдельные ее средства, а именно систему как единое целое;
- 2) показатель эффективности и его зависимость от установленных факторов должны обеспечить возможность получения количественной оценки с требуемой достоверностью;
- 3) область изменения показателя эффективности должна иметь четко очерченные границы.

Для сложных систем трудность задачи выбора конкретного показателя эффективности возрастает в еще большей степени. Многочисленность элементов и связей в составе системы обуславливает многообразие состояний последней. Действительно, из-за наличия и воздействия различного рода случайных факторов и возмущений возможно такое состояние системы, когда в ходе взаимодействия один или несколько элементов в ней полностью или неполностью выполняют свои функции. Если учесть, что элементов и связей в сложной системе много, то естественно, что число их сочетаний будет чрезвычайно большим. Но это множество со-

стояний системы, характеризующихся только отказами и неисправностями отдельных элементов, может привести к различным результатам с точки зрения функционирования всей системы. Например, возможен случай, когда отказ одного из элементов приводит к тому, что конечный результат в системе не достигается. Но возможны также и случаи, когда и при плохой работе одного или нескольких элементов конечная цель при функционировании системы все же достигается, однако при этом не удовлетворяются заранее определенные ограничения. Из-за влияния случайных факторов вполне допустим случай, когда отдельный элемент (элементы) выполняет свои функции неудовлетворительно, но конечная цель тем не менее достигается. Следовательно, множество возможных состояний системы и конечных эффектов только затрудняет выбор конкретного вида показателя эффективности.

Неоднозначность выбора показателя эффективности можно также проиллюстрировать на следующем примере: пусть необходимо оценить работу автоматизированной системы управления истребительного авиационного полка (ИАП), который для обслуживания n воздушных целей назначает c истребителей–перехватчиков полка.

Эффективность функционирования АСУ ИАП с точки зрения заказчика можно оценить через показатель, представляющий собой отношение $\frac{c}{n}$. Чем меньше

это отношение, тем более эффективным будет ведение боевых действий истребительным авиационным полком. Но если к этой оценке подходить с точки зрения командира полка, то, очевидно, увеличение числа назначаемых истребителей приведет к росту числа самолетовылетов, а, значит, материальных и временных затрат на подготовку к вылету и послеполетное обслуживание авиационной техники. И тогда в качестве показателя эффективности следует рассматривать отношение

$$\frac{c + \sum_i c_i}{n}, \text{ где } \sum_i c_i - \text{суммарные расходы на увеличение числа самолетовылетов.}$$

Минимум указанного отношения, соответствующий оптимальному режиму боевых действий истребительного авиационного полка, в общем случае будет уже другим. Следовательно, решение вопроса об оценке эффективности может измениться в зависимости от уточнения подхода к объекту исследования.

В общем случае показатель эффективности обычно записывают в виде функционала от ряда параметров и переменных, характеризующих отдельные элементы и систему в целом. При этом величина показателя эффективности определяет качество процесса преобразования входных воздействий при решении системой поставленной задачи.

Сложные системы функционируют, как правило, в условиях действия большого числа случайных факторов. Поэтому и результат применения сложной системы носит случайный характер. Например, поражение цели зенитной управляемой ракетой представляется в виде сложного случайного события, состоящего из двух других случайных событий, происходящих последовательно во времени. Первое случайное событие заключается в том, что подрыв боевой части ракеты произошел в окрестности некоторой точки пространства около цели. Рассеивание точек под-

рыва боевой части ракеты относительно цели является следствием погрешностей наведения ракеты на цель и разброса точек срабатывания неконтактного взрывателя. Второе случайное событие заключается в том, что поражающие элементы боевой части ракеты, разорвавшейся в окрестности данной точки, поразят цель. Случайный характер поражения цели разорвавшейся боевой частью ракеты обусловлен рядом случайных факторов: степенью накрытия цели потоком поражающих элементов боевой части; эффективностью поражающего воздействия боевой части; уязвимостью цели; условиями встречи ракеты с целью и др.

Для того, чтобы оценка эффективности не зависела от случайного сочетания действующих факторов, в качестве показателей эффективности выбираются вероятности наступления соответствующих характерных событий (например, вероятность поражения цели одной ракетой) или средние значения соответствующих случайных величин (например, математическое ожидание числа уничтоженных самолетов при обстреле группы целей).

Набор показателей оценки эффективности функционирования системы может быть определен различными способами. Однако к настоящему времени еще не существует формальной теории, обеспечивающей однозначное и объективное решение задачи выбора показателей, так как выбор критериев оценки зависит от методов исследования и моделирования систем.

3.3. Методы оценки показателя эффективности радиоэлектронных систем управления ВВТ

К важнейшим элементам методов определения эффективности применения системы по назначению относятся выбор показателей эффективности для ее количественного представления и разработка модели эффективности. Существенным является также выбор такого метода или совокупности методов оценивания показателей эффективности, которые позволяли бы с высокой достоверностью и полнотой установить степень влияния разнообразных факторов на эти показатели и найти функциональные зависимости показателей от влиявших факторов, обеспечивающие получение обоснованных прогнозов возможностей систем по выполнению своих функций в широком диапазоне условий их применения.

Задача определения значений показателей эффективности может решаться различными методами, как теоретическими, так и экспериментальными. Применимость того или иного метода зависит от этапов проводимых исследований и той информации о системе, которой располагает исследователь. При проектировании системы, когда последняя еще не может быть объектом натурных испытаний, применяются теоретические методы, основанные на расчете значений показателей эффективности с помощью имитационных математических моделей системы и теоретических функциональных зависимостей показателей эффективности от определяющих их факторов, заданных в аналитической форме.

Среди всех возможных методов оценивания значений показателей эффективности особо выделяется *метод натурных испытаний* реальных систем в естест-

венных условиях их применения по своему прямому назначению. Метод натурных испытаний в принципе позволяет осуществить всестороннюю проверку системы в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации и применения ее по назначению.

Натурные испытания составляют неотъемлемую часть процесса разработки сложных систем и относятся к наиболее достоверному и поэтому более предпочтительному источнику информации о показателях эффективности применения систем по своему назначению. Однако для того, чтобы получить по результатам натурных испытаний достаточно точные оценки значений показателей эффективности, обычно требуется проведение большого числа экспериментов, что связано со значительными затратами материальных средств и времени. Кроме того, реализация всего комплекса условий применения сложной системы при натурных испытаниях также значительно затруднена, а в ряде случаев практически исключена.

Методы теоретических исследований предполагают создание математического (аналитического или алгоритмического) описания изучаемой системы и процесса ее функционирования. На базе этого описания исследования могут быть проведены аналитическими методами и методом статистических испытаний.

Аналитические методы весьма разнообразны и в сильной степени зависят от исследуемой математической модели системы. Главным недостатком этих методов является ограниченность их применения. Характерно, что использование для исследования сложных систем только аналитических методов оказывается возможным лишь при существенных упрощениях. Поэтому аналитическими методами можно получить, как правило, характеристики некоторой упрощенной аналитической модели системы.

Если система находится под воздействием внешних и внутренних случайных факторов, то ее функционирование представляет собой сложный случайный процесс и задача исследования системы состоит в определении его вероятностных характеристик. При использовании *метода статистических испытаний* строится вероятностная модель процесса функционирования системы, через параметры которой выражаются искомые величины. Метод статистических испытаний является достаточно общим методом исследований без каких-либо серьезных теоретических ограничений в применении. Он заключается в непосредственном моделировании систем при действии на них случайных возмущений и обработке полученных результатов методами математической статистики.

Метод статистических испытаний является методической основой исследования сложных систем при их статистическом моделировании. Статистическое моделирование сводится к построению для процесса функционирования исследуемой системы некоторого моделирующего алгоритма, имитирующего поведение и взаимодействие элементов системы с учетом случайных воздействующих факторов, и реализации этого алгоритма с использованием программно-технических средств ЭВМ. В результате статистического моделирования системы получается последовательность частных значений некоторых случайных величин или функций, статистическая обработка которых методами математической статистики позволяет получить данные о поведении исследуемого объекта. Если число реализаций достаточно велико, то полученные результаты моделирования системы приобретают статистическую

устойчивость и с достаточной степенью точности могут быть приняты в качестве оценок искомых характеристик процесса функционирования системы.

Теоретической основой метода статистических испытаний являются предельные теоремы теории вероятностей в форме законов больших чисел (теорема Бернулли, теорема Пуассона, теорема Чебышева, обобщенная теорема Чебышева, теорема Маркова и другие теоремы).

Метод статистических испытаний обладает рядом преимуществ. Одно из них состоит в независимости скорости убывания случайной погрешности определения значения исследуемого показателя качества при увеличении числа опытов от размерности вектора выходной переменной рассматриваемой системы. Важным преимуществом метода статистических испытаний является его универсальность. К основному недостатку этого метода относится сравнительно малая скорость сходимости получаемых оценок исследуемых показателей к их истинным значениям, Практическое применение метода статистических испытаний ограничивается в основном возможным объемом моделирования и расчетов. Последнее обстоятельство становится особенно важным для исследования сложных систем.

Как правило, ни методы аналитических исследований, ни метод натурных испытаний, ни методы статистического моделирования в отдельности не позволяют провести всесторонние исследования эффективности процессов функционирования сложных систем. Поэтому применяют комбинированные методы определения показателей эффективности, совместно используют аналитические методы, метод статистических испытаний моделей и натурные испытания реальных систем. Главная цель, которая достигается с помощью комбинированных методов, заключается в использовании по возможности всей информации о вероятностных характеристиках системы, полученной при различных видах исследований и на разных этапах их проведения, для более точного оценивания показателей эффективности или для получения их с требуемой точностью, но при возможно меньшем числе экспериментов с системой и ее моделью.

Реализация комбинированных методов может быть осуществлена в рамках опытно-теоретического метода определения показателей эффективности применения сложных систем по назначению, базирующегося на научно обоснованном рациональном сочетании сравнительно небольшого числа натурных экспериментов с достаточно большим объемом моделирования и аналитических расчетов.

Опытно-теоретический метод представляет собой систему взаимосвязанных по технологическим процедурам, согласованных по решаемым задачам и этапам исследований, а также по выполняемым функциям методов аналитических исследований, натурных испытаний и моделирования. Его существенной особенностью является определение зависимостей показателей эффективности сложных систем от воздействующих факторов с использованием принципов факторного планирования экспериментов и комбинированных методов получения вероятностных характеристик исследуемых систем.

Отличительную черту опытно-теоретического метода составляет использование моделей, отработанных и откалиброванных по ограниченному числу натурных экспериментов. Выбор состава, типа и структуры моделей, их отработка и доведе-

ние до состояния адекватности реальной системе, а также оценивание точности результатов моделирования образуют важнейшие элементы опытно-теоретического метода исследования сложных систем.

При реализации опытно-теоретического метода исследования сложных систем в части моделирования выполняется следующая последовательность работ:

- 1) разработка частных моделей (моделей отдельных средств исследуемой системы) и модели системы в целом (комплексной модели);
- 2) доведение разработанных моделей до состояния адекватности реальным объектам по результатам их натурных испытаний в отдельных точках факторного пространства (калибровка моделей);
- 3) оценивание показателей качества системы по результатам натурных испытаний и моделирования, организованного на основе современных методов планирования эксперимента.

Исходные данные, необходимые для разработки моделей в рамках опытно-теоретического метода, должны содержать:

- 1) назначение, состав и структуру моделируемого объекта; качественные и количественные характеристики процессов функционирования объекта (перечень характеристик, их значения или диапазоны их изменения);
- 2) характеристики внешних воздействующих факторов, соответствующие условиям реальной эксплуатации объекта (перечень характеристик, их значения или диапазоны их изменения);
- 3) варианты тактических (оперативно-тактических) ситуаций использования объекта;
- 4) характеристики средств активного противодействия применению объекта по назначению;
- 5) состав и характеристики взаимодействующих с объектом средств;
- 6) алгоритм работы операторов;
- 7) состав и характеристики средств, на которых реализуется модель.

Для качественного решения задач исследований необходима иерархическая система моделей, в которой каждая модель нижнего уровня согласована с моделями более высокого уровня, а также совокупность взаимосвязанных моделей с разной степенью структурной детализации описания объекта исследования, начиная с модели типа «вход–выход» и кончая имитационной моделью с полным раскрытием структуры моделируемого объекта.

Моделирование широко используется при отработке системы, подготовке исходных данных для натурных испытаний и анализе результатов проведенных натурных экспериментов. Рациональное сочетание разных взаимно согласованных методов исследований в рамках комплексного опытно-теоретического метода, как правило, позволяет оценить значения показателей эффективности для всех практически важных условий применения сложных систем.

Опытно-теоретический метод хорошо вписывается в схему процесса автоматизации исследований различных систем и поэтому может служить методической основой построения автоматизированных систем исследования образцов вооруже-

ния на разных стадиях их жизненного цикла. Применение математического моделирования способствует автоматизации исследований с помощью ЭВМ.

Моделирование – научный метод исследования объекта-оригинала путем замены его более удобной и доступной для исследования системой – моделью, отображавшей существенные свойства оригинала, и определения характеристик модели в целях изучения моделируемого объекта и получения новых научных знаний о нем. *Модель* – это такая материально реализованная или теоретическая идеальная система (отображение моделируемого объекта), которая, воспроизводя существенные свойства объекта, заменяет в том или ином смысле объект–оригинал так, что ее непосредственное изучение дает новые знания об объекте–оригинале.

В настоящее время практически во всех областях техники моделирование является обязательным элементом процесса обоснования, разработки, испытаний и внедрения в эксплуатацию сложных технических систем.

Применение опытно-теоретического метода предполагает использование различных методов моделирования с разработкой совокупности моделей, начиная с частных и комплексных математических моделей и кончая разными модификациями физического и смешанного моделирования.

Математическое моделирование – метод исследования процессов и объектов, основанный на построении и исследовании математических моделей.

Математическая модель объекта – система математических и логико-математических соотношений, описывающих процесс функционирования и условия применения объекта, предназначенная для определения количественных и (или) качественных характеристик объекта.

Эмпирическое моделирование представляет собой метод исследования процессов или объектов, при котором они воспроизводятся с сохранением их физической природы или с использованием подобных физических явлений. *Физическое моделирование* отличается большой наглядностью результатов и позволяет исследовать широкий класс процессов, как поддающихся, так и неподдающихся математическому описанию. Физические модели не являются универсальными. Во многих случаях лучших результатов можно добиться, используя смешанные модели, сочетающие элементы математического и физического моделирования. Та часть процесса, которая поддается математическому описанию, моделируется математически; по той же части процесса, для которой математического описания нет или оно очень громоздко и трудно получаемо, используется физическая модель или даже часть реального исследуемого объекта.

Математические модели отличаются большим разнообразием. Все математические модели можно разделить на аналитические и алгоритмические.

Аналитическая модель объекта – модель, в которой система математических соотношений представлена в виде аналитических (формульных) зависимостей и уравнений. Если чисто аналитическое описание объекта невозможно или непригодно для исследования, то разрабатывают алгоритмическое описание с последующей его реализацией в виде программы на ЭВМ. В результате получают машинную математическую модель, отображающую структуру и поведение системы, ее компонентов и взаимодействие между ними. Выполнение программы позволяет имитировать дина-

мические процессы, происходящие в моделируемой системе, в их естественной последовательности с соблюдением причинно-следственных отношений. Каждый акт воспроизведения течения процесса функционирования системы с помощью моделирующей программы с последующей регистрацией получаемых данных называется *имитационным экспериментом*. В отличие от натурных экспериментов здесь возможна такая целенаправленная организация имитационных экспериментов, которая обеспечивает существенное использование информации о внутреннем строении машинной модели и учитывает особенности ее функционирования.

Для сложных моделей процедуры подготовки имитационных экспериментов, сбора, хранения и обработки их результатов не являются тривиальными. Появляется необходимость в прикладных программах, реализующих процедуры планирования экспериментов и обработки получаемых при их выполнении данных. Процесс машинного имитационного моделирования поэтому не сводится лишь к имитации исследуемых объектов, а включает также анализ структурных и динамических свойств машинных моделей этих объектов и проведение целенаправленных имитационных экспериментов, предоставляющих пользователю информацию о моделируемом объекте и помогающих принимать решения о свойствах этого объекта.

Программное обеспечение моделирования, образующее совместно с машинными моделями объекта исследований единую имитационную систему, предоставляет возможности целенаправленного выбора модели, анализа ее структурных и динамических свойств, чувствительности, устойчивости и других характеристик, используемых как для оценивания качества работы модели, так и для организации целенаправленных экспериментов с ней. Эти возможности предоставляются как в режиме автономной работы модели, так и в режиме диалога с пользователем. Программное обеспечение моделирования служит программной поддержкой процессов построения моделей и работы с ними.

Имитационное моделирование как метод научных исследований представляется в виде совокупности способов алгоритмизации объектов исследования и программной реализации алгоритмических описаний, методов организации, планирования и выполнения на ЭВМ целенаправленных машинных экспериментов с имитационной моделью, методов машинной обработки и анализа получаемых данных.

В настоящее время машинное имитационное моделирование получило достаточно широкое распространение как одно из наиболее эффективных средств исследования сложных систем и процессов. В области военного дела имитационное моделирование используется для обеспечения решения таких исследовательских задач, как обоснование требований к вооружению и способам его боевого применения, оценивание степени влияния различных факторов на боевые возможности вооружения, планирование операций и анализ эффективности боевых действий войск и т.д.

Достоинством математических моделей вообще, и в том числе имитационных, является их достаточно высокая степень универсальности, возможность исследования посредством этих моделей любых процессов, включая и те, которые в настоящее время не удается осуществить физически, широкие возможности отыскания решений исследовательских задач. Математическая модель сложной системы может быть построена в следующих случаях:

до того, как будет создана сложная система с целью оценивания ее будущих характеристик и оптимизации системы;

на этапе построения системы для исследования ее возможных вариантов;

после построения и внедрения системы с целью оценивания эффективности ее применения по назначению и определения направлений дальнейшего совершенствования.

К типовым этапам построения и применения имитационной модели относят:

1) формулирование решаемой методами моделирования проблемы (описание исследуемой проблемы и определение целей исследования);

2) изучение исследуемой системы и построение ее содержательного описания, выраженного в понятиях определенной предметной области;

3) построение формализованного описания моделируемой системы, представляемого формальными категориями на основе знаний, содержащихся в ее содержательном описании;

4) разработка моделирующего алгоритма;

5) реализация модели на ЭВМ, включая трансляцию модели (перевод модели на язык, приемлемый для используемой ЭВМ) и отладку ее программы; верификация модели (установление правильности машинной программы модели);

6) проверка адекватности (соответствия) модели моделируемой системе, оценивание точности модели и определение ее пригодности для проведения исследований;

7) планирование имитационного машинного эксперимента;

8) проведение имитационного машинного эксперимента (прогон модели на ЭВМ в соответствии с выбранным планом для получения требуемой информации);

9) обработка и анализ результатов моделирования, их интерпретация;

10) выработка рекомендаций и практическое использование результатов моделирования.

Типовые этапы образуют технологическую последовательность создания и отработки моделей, определения их пригодности для применения по назначению, а также устанавливают порядок работы с моделями и проведения имитационного исследования в целом. Эти этапы, однако, редко выполняются в строго заданной последовательности, начиная с определения проблемы и кончая документированием. Процесс имитационного исследования является итеративным. В ходе его могут наблюдаться сбои в прогонах модели, выявляться ошибочные допущения, от которых приходится отказываться, проводится переформулировка целей исследования, выполняется повторное оценивание исследуемых характеристик и перестройка модели.

Часто при исследовании сложных систем применяют комбинированные методы оценивания показателей качества сложных систем

Рассмотрим сущность комбинированных методов на примере оценивания показателя эффективности процесса функционирования технической системы по результатам ее натуральных испытаний и моделирования.

Пусть показателем K является математическое ожидание некоторого функционала ϕ от выходной переменной системы y , которая в свою очередь, зависит от входных воздействий x . Тогда $K = M[\phi[y(x)]]$.

Модель, воспроизводящая реальную систему, не полностью соответствует ей. Поэтому выходная переменная модели y_m не будет полностью повторять соответствующую выходную переменную y реальной системы даже при одинаковых входных воздействиях. Оценка исследуемого показателя может быть найдена методом статистических испытаний как среднее арифметическое значение элементов выборки, полученной на реальной системе (при натурном эксперименте) $\hat{K}_n$ или ее модели $\hat{K}_m$ с соответствующими объемами выборок n_n и n_m .

Точность оценки, полученной по результатам моделирования характеризуется показателем

$$\hat{K}_m = \sqrt{(M[\hat{K}_m - K]^2 + D[\hat{K}_m])},$$

учитывающим как систематическую, так и случайную составлявшие погрешности.

Если модель адекватна реальной системе, то смещение оценки $\hat{K}_m$ близко к нулю, а ее дисперсия при неограниченном увеличении объема выборки n_m стремится к нулю.

При моделировании проще (чем при натурных испытаниях реальной сложной системы) получить статистические данные достаточно большого объема и обеспечить тем самым малую случайную погрешность оценки показателя K . Значительно труднее добиться малого смещения оценки, т.е. малого значения ее систематической погрешности.

Оценка параметра $\hat{K}_m$, рассчитанная по выборке большого объема и поэтому имеющая малую случайную погрешность, окажется непригодной для характеристики качества системы, если не удастся уменьшить ее систематическую погрешность до приемлемой величины. Поэтому возникает необходимость в поиске методов уменьшения смещения оценки $\hat{K}_m$.

Частичную или полную компенсацию систематической погрешности можно получить путем введения в оценку параметра соответствующей поправки, характеризующей величину смещения результатов моделирования от результатов натурных испытаний, она может быть найдена по оценкам $\hat{K}_n$, $\hat{K}_{nm}$ показателя K , полученным на реальной системе и ее модели при идентичных входных воздействиях. Разность $\hat{K}_n - \hat{K}_{nm}$ содержит информацию о величине смещения и эта разность будет приближаться к истинному значению смещения, если число опытов с системой и ее моделью возрастает и они проводятся в одинаковых условиях.

Выражение для оценки показателя, в которой учтена поправка, имеет вид

$$K^* = \hat{K}_m + (\hat{K}_n - \hat{K}_{nm}).$$

Оценка K^* называется *комбинированной*, так как она получена путем объединения нескольких оценок.

Введение поправки, уменьшавшей систематическую погрешность, не должно приводить к значительному увеличению случайной погрешности, иначе качество

оценки останется низким. При введении поправки необходимо сохранить малое значение случайной погрешности.

Обычно объем натурных испытаний n_n и соответственно объем моделирования, проводимого с целью выявления смещения, из-за ограниченности ресурсов не может быть большим. В этом случае дисперсии оценок как дисперсии соответствующих средних арифметических значений для независимых наблюдений будут значительными по величине. Их вклад в дисперсию оценки K^* окажется существенным, если оценки $\hat{K}_n$ и $\hat{K}_{nm}$ независимы между собой.

Для коррелированности оценок $\hat{K}_n$ и $\hat{K}_{nm}$ необходима идентичность входных воздействий, поступавших на реальную систему и подаваемых на ее модель, а также достаточно высокая степень близости модели к системе. При условии несмещенности оценок K^* и $\hat{K}$ показателя K , сравниваются только их дисперсии.

Отношение дисперсий оценок, характеризующее величину выигрыша по точности при применении комбинированного метода оценивания показателя K по сравнению с методом натурных испытаний, имеет вид

$$\eta = \frac{D[\hat{K}]}{D[K^*]} = \frac{n_n}{n} \frac{1}{1 - \frac{n_m}{n_n + n_m} r^2},$$

где r – коэффициент корреляции оценок.

При числе натурных экспериментов, проводимых при комбинированном оценивании показателя K , равном случаю определения этого показателя только по результатам одних натурных испытаний системы, т.е. $n_n = n$

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{n_m}{n_n + n_m} r^2}.$$

При объеме натурных испытаний, значительно меньше объема моделирования ($n_n \ll n_m$), с высокой степенью точности применяется выражение

$$\eta = \frac{1}{1 - r^2},$$

откуда следует, что выигрыш в точности оценки при комбинированном оценивании показателя K отсутствует, если коэффициент корреляции равен нулю, и он возрастает с ростом модуля этого коэффициента.

Соотношение между объемами натурных испытаний n_n и n при одинаковой точности оценок K^* и $\hat{K}$, а также при $D[K^*] = D[\hat{K}]$, представляется в следующем виде:

$$\frac{n}{n_n} = \frac{1}{1 - \frac{n_m}{n_n + n_m} r^2}$$

или при $n_n \ll n_m$

$$\frac{n}{n_n} = \frac{1}{1 - r^2}.$$

Соотношение между объемами натуральных испытаний при одинаковой точности оценок также определяется величиной коэффициента корреляции. При $r \neq 0$ комбинированное оценивание показателя обеспечивает такую же точность оценки при меньшем объеме натуральных испытаний.

Таким образом, комбинированная оценка K^* по сравнению с оценкой $\hat{K}$, полученной только по результатам натуральных испытаний, предпочтительнее по точности или экономичности получения только тогда, когда обеспечена высокая корреляция результатов натуральных испытаний и результатов моделирования, используемых для коррекции оценки. Для этого должна быть обеспечена адекватность модели исследуемой системе, а также адекватность модели внешних воздействий реальным воздействиям.

3.4. Исследование операций, анализ и синтез радиоэлектронных систем управления ВВТ

Военно-экономический анализ и тактико-техничко-экономическое обоснование вооружения представляют собой ветви системных исследований, базирующихся на системном подходе к решению разнообразных проблем военной теории и практики. Прилагательное «системный» в применении к целому ряду понятий (метод, исследование, особенность, взгляд, модель) означает учет в этих понятиях принципов системного подхода.

Сущность системных исследований заключается в использовании фундаментального методологического понятия системы как единого абстрактного образа исследуемых конкретных объектов любой материальной природы и степени сложности в выделении ведущих, определяющих сторон, тенденций развития системы, в представлении решаемой проблемы как своеобразной концептуальной системы.

Системный подход – это подход, при котором все связи и опосредствования, элементы, функции и проблемы рассматриваются в виде взаимосвязанного целого. Задачей системного подхода является выражение на уровне специальной методологии науки общенаучных принципов, положений, понятий, форм и методов системных исследований, в соответствии с которой каждый объект, представляемый как система, рассматривается не только как нечто самостоятельное целое, а также как часть системы более высокого уровня сложности со всеми ее существенными взаимосвязями с другими объектами, входящими в состав этой более сложной системы.

В основе системного подхода лежит стремление установить общую ориентацию исследований и зафиксировать научными средствами целостность, организованность исследуемого объекта {системы, проблемы, явления, процесса) во всей его полноте и во всем многообразии связи в объекте. Этот общий принцип ориентирует исследователя на рассмотрение объектов как систем.

Системный подход кроме системности объекта исследования предполагает еще и системность мышления. Полнота, завершенность и эффективность исследования будут обеспечены, если исследователь будет организовывать свое исследование как некоторую концептуальную систему. Здесь уместно указать на различия системного и комплексного подходов к рассмотрению объекта исследования.

Комплексный подход – это подход, предполагавший одновременный учет всех аспектов, особенностей и факторов, прямо или косвенно влиявших на решение проблемы, но не исходящий непосредственно из идей их взаимоувязанного единого целого.

Комплексный подход в научном исследовании означает всестороннее изучение объекта или проблемы в тесном взаимодействии с представителями самых разнообразных наук и научных направлений, с привлечением различных научных теорий и методов.

Сама по себе комплексность недостаточна для выявления полной картины исследуемого объекта или явления, ее должна дополнять системность. Системный подход является развитием комплексного подхода, поскольку при нем более глубоко, более точно отражаются внутренние и существенные связи и отношения компонентов некоторой системы, закономерности ее функционирования, что является основой создания более полной теории исследуемого объекта.

Понятие «системность» в некотором смысле шире, глубже, чем комплексность. Оно охватывает связи внутри одного уровня (горизонтальные) и между разными уровнями (вертикальные), тогда как понятие «комплексность» охватывает преимущественно связи одного или сменных уровней иерархической структуры данной системы. В общих чертах особенности системного подхода, отличавшие его как методологическую концепцию в исследовании явлений окружающего нас мира, сводятся к следующему:

при исследовании объекта как системы описание его элементов не является определяющим, поскольку каждый из элементов представляется не как изолированный, а с учетом его «места» в целом;

исследование объекта как системы оказывается неотделимым от исследования его взаимосвязей с внешней средой, поскольку объект изучается как подсистема более крупной системы, образованной объединением объекта со средой;

специфической особенностью является учет новых свойств, возникающих при объединении элементов в систему и не сводящихся к простой сумме свойств элементов, образующих эту систему.

В силу высокой общности системный подход основывается на ряде принципов диалектики, таких, как взаимосвязь и развитие, зависимость (связность) и независимость (автономность), качественное различие части и целого. Однако системный подход даже в реализации этих принципов уже диалектики. Для подтверждения этого можно указать, в частности, на принцип развития, который в системном подходе представлен лишь через движение и изменение, в то время как принцип отрицания в развитии, присущий диалектике, конструктивно не входит в системный подход.

Как относительно самостоятельная часть диалектически системный подход включает и ряд специфических признаков, к числу которых прежде всего относится

принцип системности, требующий рассмотрения объектов исследования как систем. Другим принципом является *принцип конечной цели*: абсолютный приоритет конечной (глобальной) цели. Это означает, что все должно быть подчинено глобальной цели (основной функции, основному назначению) целенаправленной системы. Любая попытка изменения, совершенствования и управления в такой системе должна оцениваться с точки зрения того, помогает или мешает она достижению конечной цели. Это накладывает особую ответственность на выбор цели и ее четкую трактовку. Расплывчатые, не полностью определенные конечные цели влекут за собой неясности в структуре и управлении системой. Следующий принцип - это принцип иерархичности познания, требующий трехуровневого изучения объекта: изучение самого объекта – «собственный» уровень; изучение этого же объекта как элемента более широкой системы – «внешний» уровень и, наконец, изучение этого объекта в соотношении с составляющими данный объект компонентами – «нижний» уровень.

Еще одним принципом – *принципом интеграции* – отражается особенность системного подхода, направленного на изучение интегративных свойств и закономерностей систем, раскрытие базисных механизмов интеграции целого.

Важным принципом системного подхода является *принцип функциональности*: совместное рассмотрение структуры и функции с приоритетом функции над структурой. Этот принцип утверждает, что любая структура тесно связана с функциями системы и ее частей, а исследовать (создавать) структуру необходимо после уяснения функций в системе. На практике принцип функциональности, в частности, означает, что в случае придания системе новых функций полезно пересмотреть ее структуру, а не пытаться втиснуть новую функцию в старую схему.

Приведенные выше основные принципы системного подхода дополняются и рядом других принципов. Одни из них в определенной степени дублируют или уточняют основные принципы, другие имеют более узкую направленность или область применения. Так, дополнительными принципами являются:

принцип связности: рассмотрение любой части совместно с ее связями с окружением;

принцип единства: совместное рассмотрение системы как целого и как совокупности частей (элементов);

принцип иерархии: полезно введение иерархии частей (элементов) и (или) их ранжирование;

принцип сочетания централизации и децентрализации;

принцип неопределенности: учет неопределенностей и случайностей в системе;

принцип организованности: решения, действия, выводы в системе должны соответствовать степени ее детализации, определенности, организованности. Принцип чувствительности близок к принципу организованности: вмешательство в систему должно согласовываться с уровнем ее реакции на вмешательство;

принцип свертки: информация и управляющие воздействия свертываются (укрупняются, обобщаются) при движении снизу вверх по иерархическим уровням;

принцип формализации: системный подход нацелен на получение количественных характеристик, создание методов, сужающих неоднозначность понятий, определений, оценок и т.п.

Основные проблемы системного подхода связаны с развитием методов практической реализации указанных принципов, и в частности, с выявлением законов объединения частей в целое, т.е. законов, определявших характер структуры, функционирования и развития, связи с условиями и средой существования, предельных характеристик систем; с разработкой содержательных и формальных средств представления исследуемых объектов как систем; с исследованием методологических оснований различных системных теорий и т.д.

Всестороннее изучение любой системы предполагает установление состава ее компонентов, структуры и функций как системы в целом, так и ее составных частей, а также факторов, обеспечивающих целостность и относительную самостоятельность системы. Соответственно этому в системном подходе выделяют системно-компонентный, системно-структурный, системно-функциональный и системно-интегративный аспекты.

Системно-компонентный аспект системного подхода предусматривает в качестве начального этапа исследования системы изучение ее элементного состава. Он связан с поиском ответа на вопрос о том, из чего, из каких компонентов образовано целое. При этом считается, что компоненты системы – это те структурные единицы, взаимодействие которых обеспечивает присущие системе качественные особенности.

Компоненты системы могут разными способами связываться в целое. Вопрос о том, как образованы эти связи, т.е. какова структура системы, решает *системно-структурный аспект* системного подхода. Он предусматривает изучение разнотипных связей, объединявших элементы в систему. Структура системы играет огромную роль. Она связывает компоненты, придавая системе некоторую вполне определенную общность, целостность, она обуславливает возникновение новых свойств, не присущих ни одному из компонентов. Особенно большое значение для сохранения системы имеет относительная самостоятельность, устойчивость структуры. Без устойчивых связей, взаимодействия компонентов, т.е. без структуры, система перестала бы существовать как конкретное целое.

Важным аспектом системного подхода является *системно-функциональный аспект*. Он связан с изучением поведения отдельных частей системы и рассмотрением функционирования системы в целом. Каждая реальная система выполняет определенные функции, представляющие собой интегративный результат функционирования ее компонентов, функции компонентов по отношению к системе носят целесообразный характер, в противном случае компонент выпадает из системы, становится для нее инородным телом. Функции компонентов согласованы во времени и пространстве и являются во многом результатом воздействия на них общесистемных функций.

Одним из кардинальных аспектов системного подхода является вопрос о факторах системности, т.е. о тех механизмах, которые обеспечивают сохранение качественной специфики системы. Наиболее общим, универсальным основанием системности является материальное единство мира с присущими в действительности диалектическими принципами взаимосвязи и движения. Вместе с тем, в различных областях действительности и в каждом конкретном типе систем эти принципы обретают специфическую форму.

Рассмотренные аспекты системного подхода в своем единстве и взаимодействии превращают системный подход в эффективное средство познания.

При научных исследованиях, наряду с совместным применением всех аспектов, используется один из аспектов или частная комбинация отдельных аспектов. Весьма распространенным в науке и практике является, например, структурный подход, содержанием которого является познание структуры, внутренней взаимосвязи компонентов целостной системы. Со структурным неразрывно связан функциональный подход к изучению целостной системы. Однако всестороннее исследование системы, процесса или проблемы может быть обеспечено только совокупным применением всех аспектов системного подхода.

Системный подход в настоящее время развивается, главным образом, в направлении расширения его приложений, т.е. применения его для решения конкретных теоретических и практических проблем различных областей науки, техники, управления социально-экономическими процессами и т.п.

Системный подход в его современном виде позволяет органически соединить анализ и синтез, качественное к количественное в исследовании различных объектов и процессов, что открывает широкие возможности для применения эвристических и логико-математических методов, а также современных ЭВМ.

3.4.1. Системный подход и системный анализ

Системный подход тесно связан с общей теорией систем и системотехникой, в частности.

Общая теория систем выступает как интегральная теория, предметом которой являются законы образования, поведения и развития любых систем во всем многообразии аспектов их функционирования. В задачи общей теории систем входят:

- разработка средств представления исследуемых объектов как систем;
- построение обобщенных описательных и формальных моделей систем и моделей различных классов и свойств систем, включая модели динамики систем, их целенаправленного поведения, развития, иерархического строения, процессов управления в системах и т.д.;

- исследование концептуальной (логической) структуры системных теорий.

Общая теория систем предлагает единый абстрактно-математический аппарат для исследования систем самых различных типов, классов и назначения – технических, экономических, биологических и т.д., т.е. она интересуется самыми фундаментальными понятиями и аспектами систем произвольной природы, любой сложности и любого назначения. С помощью этой теории изучаются не частные свойства систем (что составляет предмет других конкретных наук), а их общее структурное построение.

Основой для создания общей теории систем являются аналогии (изоморфизм, в частности) процессов, протекающих в системах различного типа. Строго доказанный изоморфизм для систем различной природы дает возможность строить обобщенные модели систем и переносить знания из одной предметной области в другую.

Системологией называется теория сложных систем, которая как научная дисциплина ставит своей целью создание и изучение как более общих способов опи-

сания, законов функционирования и методов анализа и синтеза сложных систем вне зависимости от их физической природы. В системологии развиваются теория абстрактных описаний и математического моделирования систем, общая теория системных исследований на базе математических и эвристических методов.

Составной частью системологии, занимающейся техническими системами, является системотехника, которая возникла и выделилась в результате усложнения процесса инженерного проектирования и необходимости его рационализации с системных позиций.

Системотехника – область научных знаний, которая включает теорию, методологию и аппарат исследования и создания сложных технических систем, способных к целенаправленному действию в сложных ситуациях.

Термин «системотехника» первоначально начал использоваться для описания обобщенного подхода к проектированию систем конструирующих для решения различных задач, при условии, что эти задачи будут решаться наиболее эффективным из всех возможных способом, причем каждый элемент системы будет рассматриваться не сам по себе, а во взаимодействии с другими элементами. Объектом системотехники являются сложные технические системы.

Если раньше в качестве предмета изучения системотехники чаще всего выделяли проектирование системы, понимая под проектированием и методы поиска системных характеристик объекта проектирования, и методы формирования эффективной системы процедур проектирования, то теперь положение существенно изменилось. В настоящее время предмет системотехники трактуется шире и включает не только процессы проектирования, но и процессы испытаний, производства, эксплуатации и использования по назначению технических систем. Последняя точка зрения в большей степени соответствует духу системного подхода.

Конкретизация задач системного подхода применительно к проблемам исследования технических систем привела к возникновению системотехнического подхода. Здесь системный подход проявляется более конкретно, например в том, что каждый компонент сложной технической системы должен разрабатываться так, чтобы для системы в целом обеспечить достижение поставленной перед нею цели и при этом с требуемой эффективностью.

К числу задач, решаемых на основе системотехнического подхода, обычно относят: определение общей структуры технической системы, организацию взаимодействия между подсистемами и элементами, учет влияния внешней среды, выбор оптимальной структуры, параметров и алгоритмов функционирования системы. Одним из важнейших разделов системотехники, обслуживаемых системотехническим подходом, является синтез сложных технических систем. Он опирается на математическое моделирование и на ряд прикладных математических дисциплин, в первую очередь на математическое программирование, техническими средствами синтеза служат ЭВМ и системы на основе ЭВМ, информационные, имитационные, автоматизированного проектирования.

Концепция системотехники состоит в представлении реальных (участвующих) или воображаемых гипотетических (создаваемых) сложных технических систем с помощью моделей и в исследовании таких моделей. Модель воспроизводит,

имитирует сложную систему в определенном диапазоне условий и требований. Она позволяет проверять идеи, выдвигаемые в процессе разработки, методы и средства их реализации и оценивать предполагаемый результат.

Весь процесс проектирования технической системы можно разделить на две стадии: 1) макропроектирование (внешнее проектирование), в процессе которого решаются задачи функционально-структурного построения системы в целом; 2) микропроектирование (внутреннее проектирование), связанное с разработкой элементов системы как физических единиц и с получением технических решений по основным элементам (конструкции, параметрам, режимам эксплуатации и т.п.). В соответствии с этим делением проектирования системотехника определяется как совокупность точек зрения, методов и подходов, связанных с макропроектированием сложных систем. Микропроектированием же занимается схемотехника.

Системотехника, зародившаяся первоначально в связи с решением задач проектирования, в настоящее время понимается более широко, а именно: как научное направление, охватывавшее не только проектирование, но и создание, испытания и эксплуатации сложных технических систем.

Системный подход в сфере техники оказался особенно продуктивным в силу того, что современная техника, в каких бы аспектах она ни рассматривалась, по своему существу является системной.

Тесная связь системного подхода с общей теорией систем проявляется в том, что он заимствует у нее понятие системы, определяющие признаки сложных систем и ряд других положений. Однако системный подход одновременно с этим остается самостоятельной частью и областью научных знаний, вытекающей из материалистической диалектики как одна из важнейших методологий системных исследований не только систем, но и разнообразных проблем, явлений, процессов. Он опирается на диалектический закон взаимосвязи и взаимообусловленности явлений в природе и обществе и требует рассмотрения объекта или явления не только как самостоятельной системы, но и как части системы высшего уровня.

Системный подход – общеметодологический принцип системных исследований. Его рецептурной, аппаратной реализацией является *системный анализ*, который образно можно назвать технологией системного подхода. Этот анализ представляется как совокупность методических средств реализации системного подхода при подготовке и обосновании решений по сложным проблемам различного характера.

Термин «системный анализ» раскрывает основные черты исследования проблем с помощью такого анализа. Если термин «системный» используется для пояснения того факта, что в основе исследований лежит концепция систем, то термин «анализ» указывает на характер процедуры обоснования решений, которая состоит в том, чтобы разделить проблему в целом на ее составные части, более доступные для решения, применять наиболее подходящие специальные методы для решения отдельных задач и объединить частные решения в общие. В процессе проведения системного анализа тесно переплетаются методы анализа и синтеза.

Как известно, под анализом вообще понимается метод исследования путем логического (мысленного) разложения целого (системы, проблемы, процесса) на составные части и изучения отдельных сторон и свойств целого и его составных

частей. Основным принципом, принимаемым при проведении анализа, является разделение сложной проблемы на частные задачи, которые легче поддаются решению, а также расчленение сложной системы или процесса ее функционирования на компоненты.

Синтез – это метод исследования объекта (или процесса) путем воссоединения целого из частей, обобщение и сведение в единое целое данных, добытых анализом. Анализ и синтез – противоположно направленные (анализ – от целого к части, синтез – от частей к целому) и вместе с тем взаимосвязанные и взаимообусловленные методы познания, обеспечивавшие высокую эффективность исследования в случаях их комплексного использования. Несколько другое и более конкретное толкование понятий анализа и синтеза связано с двумя противоположными задачами исследования сложных технических систем.

Задача анализа состоит в определении свойств системы по ее структуре и значениям параметров; задача синтеза – в определении структуры и значений параметров системы по заданным свойствам.

Ведущей концепцией системного анализа служит системный подход, определявший основные его принципы: целенаправленность, рассмотрение исследуемых объектов или решаемых проблем как систем, поиск и анализ нескольких вариантов решения проблемы и выбор оптимального, сбалансированность применяемых методов исследования.

Для системного анализа характерно наличие определенных типовых стандартных компонентов, которые практически присутствуют в анализе любой проблемы с системных позиций. Такими компонентами являются: цель, пути достижения цели, потребные ресурсы. Сочетание этих компонентов в определенной последовательности, диктуемой структурой проблемы и причинно-следственными связями, приводит к упорядоченному решению проблемы. Рассмотрение возникающих проблем в строгой логической последовательности дает возможность плодотворно сочетать формализованные методы (статистические методы, методы математического программирования, теории игр и т.д.) и эвристические методы (метод сценариев, методы экспертного оценивания и т.п.) обоснования и принятия решений более высокого качества. Основными укрупненными этапами системного анализа как процесса являются формирование проблемы, определение целей, разработка и исследование альтернативных путей (способов) достижения поставленных целей, сравнение альтернатив и выбор оптимального способа достижения общей цели.

Проблема в общем понимании является отражением проблемной ситуации, т.е. объективно возникающего противоречия между знанием о потребностях людей о каких-либо практических или теоретических действиях и незнанием путей, средств, методов, приемов, способов реализации этих действий.

При формулировании проблемы, являющейся одним из главных этапов системного анализа, необходимо уяснить возникшую ситуацию и убедиться в существовании проблемы. Как правило, в любой конкретной ситуации главная проблема сразу не видна или редко бывает выражена четко. Прямо или косвенно она связана с многочисленными, другими проблемами. Поэтому нужно составить их полный перечень и выявить, решение какой из проблем приводит к разрешению ситуации и,

следовательно, установить, какая проблема является главной. Затем следует дать ей четкую формулировку, уточнить ее связи с другими проблемами и определить принципиальную разрешимость этой проблемы. Иногда для этого приходится предварительно разрешить некоторые частные проблемы из составленного перечня.

На основе формулировки проблемы осуществляется формирование цели. Оно имеет два аспекта: выделение целей (включая определение степеней их предпочтительности) и формулирование целей в виде, удобном для эффективного управления работами по их достижению. Формирование целей начинается с составления исходного каталога целей.

Общая цель разрешения проблемы может быть выражена, как правило, общим качественным требованием (например, «Повысить эффективность...»). Поэтому, кроме общей цели, выявляются промежуточные, частные цели и подцели, достижение которых обеспечивает достижение общей цели. Все эти цели должны быть совместимы, т.е. не противоречить друг другу. Для получения информации об исходном каталоге целей используется, как правило, описательная экспертиза в форме сценариев.

Сценарий – это логически обоснованное описание развития событий в их причинно-следственной связи. При составлении сценария устанавливают, какими средствами и при каких условиях возможно достижение желаемого результата. Каждый сценарий представляет собой предположение об одном из возможных вариантов изменения обстановки. Вариант обстановки отличается от сценария тем, что в его описании отсутствует динамика развития событий.

На основе сценариев формируется общая (главная, глобальная) цель, обеспечивающая желаемую ситуацию в будущем. Далее сформулированная общая цель разворачивается в иерархию целей. По мере перехода от верхнего уровня иерархического построения целей к нижним уровням происходит конкретизация целей.

Необходимость разбиения (декомпозиции) главной цели на подцели обусловлена тем, что главную цель обычно не удастся непосредственно связать со средствами ее достижения. Разбиение главной цели на подцели продолжается до тех пор, пока не появится возможность связать цели нижних уровней иерархической системы подцелей со средствами, обеспечивавшими их достижение.

При декомпозиции главной цели руководствуются следующими принципами:

- достижение главной цели обеспечивается достижением иерархической совокупности подцелей разных уровней;
- средства достижения цели вытекают из самой цели;
- цели нижнего уровня являются средствами достижения целей вышестоящего уровня.

В результате выполнения описанной процедуры формирования целей создается целевая модель в виде связного ориентированного иерархического графа, вершины которого соответствуют целям, а дуги – связям между ними, причем вершина верхнего уровня представляет собой главную цель. Вершины графа изображают цели и подцели, расположенные по уровням. Такое представление дает разбиение некоторой исходной цели на множество подцелей, раздельное достижение которых обеспечивает достижение исходной цели. Каждая из подцелей может,

в свою очередь, быть также разбита на подцели. Число уровней разбиения теоретически известны.

Основной принцип построения графа целевой модели заключается в том, что каждая исходная цель вышестоящего уровня должна быть представлена в виде подцелей нижестоящего уровня таким образом, чтобы совокупность подцелей полностью выражала исходную цель. При построении графа целевой модели широко используются экспертные процедуры.

Построение целевой модели осуществляется в следующей последовательности: составление исходного множества целей и необходимых действий для их достижения, приводящих к желаемому результату;

проведение экспертного оценивания с целью установления отношений, характеризующих взаимосвязи между элементами множества целей;

поиск, анализ и устранение противоречий в индивидуальных экспертных оценках;

агрегирование индивидуальных экспертных оценок в групповую оценку;

построение целевой модели на основании групповой оценки экспертов.

Исходное множество целей разбивается по их назначению на классы. Классификация целей производится в два этапа:

1) распределение целей по уровням графа целевой модели;

2) упорядочение целей на каждом уровне (определение типа вершин графа целевой модели: вершины типа И и вершины типа МИ; установление приоритетов целей).

Ввиду того, что каждая цель, как правило, вносит неодинаковый вклад в достижение главной цели, возникает необходимость определения важности целей с учетом степени их вклада в достижение главной цели. Числовая характеристика свойства важности целей называется *приоритетом*. Приоритеты обычно измеряются в порядковой шкале с помощью рангов или в шкале отношений с помощью коэффициентов относительной важности.

Определение важности целей производится по окончательному варианту графа целевой модели, который будет получен после логического анализа исходного графа, проводимого для исключения возможных ошибок. Расстановка приоритетов целей необходима для выявления в дальнейшем оптимальных путей достижения главной цели.

Построение графа целевой модели осуществляется на основании информации, полученной в результате проведения экспертного опроса. Из-за возможной неполноты исходной информации и ошибок экспертов, допускаемых при построении графа целевой модели, целевая модель может оказаться некорректной. Для исключения сшибки, проводится логический анализ графа целевой модели, включающий в себя анализ непротиворечивости графа целевой модели; анализ полноты графа целевой модели; анализ избыточности графа целевой модели. На этапе этого анализа формируется полная и непротиворечивая целевая модель путем выявления и устранения локальных ошибок экспертов. В основу языка построения и анализа графа целевой модели может быть положено исчисление высказываний.

Целевая модель после логического анализа ее корректности (непротиворечивости, полноты, избыточности) может быть подвергнута аксиоматизации, являв-

шейся важным методом формализации задач системного анализа. При аксиоматическом подходе процесс системного анализа представляется в виде системы аксиом, описывающих альтернативные варианты достижения главной цели в зависимости от складывающейся ситуации. Его преимущество состоит в том, что не надо заранее знать, какое решение необходимо принять в той или иной ситуации. Оно логически выводится из системы общих принципов, положений, правил и описания сложившейся ситуации.

Иерархическая целевая модель представляет собой главный инструмент увязки целей высшего уровня с конкретными средствами их достижения на нижнем уровне через ряд промежуточных звеньев. Расчленение (декомпозиция) общей цели на подцели и построение графа целевой модели служат орудием объединения конкретных средств с общей целью. Целевая модель является той основой, которая удерживает, интегрирует вместе разнообразные средства достижения целей. Поэтому метод построения графа целевой модели считается центральным методом системного анализа.

Формирование цели всегда связано с рассмотрением некоторой проблемы, устранение которой означает, что цель сформулирована, определены альтернативные варианты ее достижения и после выбора среди них наилучшего варианта можно начать операцию по достижению цели.

Сложная проблема может быть решена разными путями. Большинство мероприятий, обеспечивавших достижение соответствующей этой проблеме цели и каждой подцели, имеет множество вариантов выполнения (альтернатив), каждый из которых в конечном итоге через достижение подцелей и затем общей цели ведет к разрешению проблемы. Например, при исследовании сложной технической системы под альтернативами понимают различные варианты ее структуры и значений параметров или различные способы применения системы по назначению.

Мероприятия, направленные на достижение общей цели, могут отличаться характером действий, видом используемых ресурсов или величиной нормативов расхода последних. Чтобы установить, как достигнуть цели (или подцели) наилучшим образом (с наименьшими затратами ресурсов, времени и т.п.), необходимо первоначально по каждой подцели выявить возможные варианты действий и затем решить задачу выбора лучшего варианта, позволяющего разрешить проблему наиболее полно или с меньшими затратами. Для выбора альтернатив необходимо иметь количественные оценки степени достижения цели. При рассмотрении технической системы ими могут быть значения всевозможных показателей свойств и эффективности применения системы по назначению.

Для выбора предпочтительной альтернативы служат *критерии-правила*, на основе которых по значениям показателей принимаются рекомендации по выбору альтернатив. Чтобы не пропустить наиболее эффективную оптимальную альтернативу достижения цели нужно собрать все возможные альтернативы, не отбрасывая даже кажущиеся надуманными и непригодными. К выявлению альтернатив желательно привлекать специалистов разного профиля. Каждый из них может внести свой вклад в решение общей проблемы. Далее альтернативы сравниваются, при этом

каждая из них оценивается как с позиций полноты разрешения проблемы, так и с позиций экономичности (затрат материальных, трудовых и временных ресурсов).

В теории решений разработано много методов оптимизации для случаев, когда альтернативы имеют количественную оценку в виде значений соответствующих показателей. На практике нередко альтернативы с помощью естественно выбранных и объективно определенных показателей не могут быть количественно оценены. Тогда прибегают к методам экспертных оценок.

Трудности в оценивании альтернатив усугубляются иногда отсутствием необходимых данных о них. Решения приходится принимать в условиях неопределенности.

В целом осуществление системного анализа предполагает наличие необходимого и достаточного объема информации о сущности проблемы, ее логической структуре, связях данной проблемы с другими, внешними по отношению к ней проблемами, информации о различного рода факторах, влиявших на решение проблемы, о наличии ресурсов для ее решения и т.д. Многие из этих факторов не поддаются количественному оцениванию, и поэтому их можно учесть, лишь используя знания, опыт и интуицию специалистов, экспертов по данной проблеме и смежных с ней проблем.

Вместе с тем системный анализ служит достаточно эффективным средством упорядочения исходной, подчас разнообразной и противоречивой информации, а также средством получения новой информации прогнозного характера. Проблемы, изучаемые системным анализом в области системотехники, заключаются в:

разработке совершенно новых систем или систем, выполняющих свои функции лучше по сравнению с существующими системами;

улучшении функционирования существующих систем; в ликвидации нежелательных ситуаций, вызванных изменением внешних и внутренних факторов, воздействующих на систему, и т.д. При этом один из основных принципов системного анализа – использование системного подхода – предопределяет необходимость учета всех основных взаимосвязей между элементами системы и между системой и внешней средой.

В соответствии с другим принципом системного анализа – принципом первичности функций по отношению к структуре системы – структура системы подчиняется основным ее функциям. Целенаправленному определению функций и структуры в существенной мере способствует применение метода структуризации, т.е. метода установления и раскрытия существенных взаимосвязей в неструктуризованных или слабо структуризованных проблемах с разработкой математических моделей в виде зависимостей между показателями эффективности и качества сложных систем, альтернативами достижения цели и характеристиками внешней среды.

Перечень приемов и методов системного анализа довольно неоднороден по своему составу, как по объему выполняемых операций, так и по степени их разработанности. В зависимости от степени использования в системном анализе формальных элементов можно выделить три группы методов: 1) формализованные математические методы (методы математического программирования, теории игр и статистических решений, статистические методы и т.д.); 2) неформализованные

эвристические методы (метод сценариев, морфологический метод, метод коллективной генерации идей, метод сравнений и т.д.); 3) комбинированные математические и эвристические методы (метод ситуаций, методы типа «Делфи», метод структуризации, метод дерева целей и т.д.).

На всех этапах системного анализа широко используются методы моделирования. При этом применяются оптимизационные, игровые, имитационные и другие модели. Построение математических моделей является основой всего системного анализа. Системный анализ тесно связан с *методами исследования операций*. Эти методы составляют основную часть математических методов системного анализа. Связь системного анализа с исследованием операций настолько велика, что иногда предпочитают не вводить термин «системный анализ» и считают, что проблематика системного анализа относится к исследованию операций при расширенном толковании последнего термина. Однако это не совсем так.

Исследование операций есть научное направление, которое можно определить как теорию математических моделей принятия решений с целевой установкой – разработка методов анализа целесообразных действий (операций) и объективное количественное оценивание возможных решений.

Термин «исследование операций» появился во время второй мировой войны, когда потребовалось находить наилучшие решения задач в условиях неопределенности, связанных с проведением различных военных операций. В послевоенные годы и методы, и область приложения исследования операций далеко вышли за свои первоначальные пределы. В настоящее время научная дисциплина «Исследование операций», являясь специфической отраслью прикладной математики, включает теорию статистических решений, математическую теорию игр, линейное и нелинейное программирование, динамическое программирование, теорию управления запасами, теорию массового обслуживания, теорию распределения ресурсов, сетевое планирование и управление, теорию назначений, теорию расписаний, теорию выбора маршрутов и т.п.

Методы исследования операций характеризуются важной особенностью: они предполагают введение в каждой задаче целевой функции, максимизация (или минимизация) которой дает оптимальное решение задачи.

Исследование операций является научным направлением, изучающим формально-математические методы обоснования решений, принимаемых в результате анализа количественных зависимостей. Основная задача исследования операций состоит в поиске математическими методами наилучших или хотя бы удовлетворительных (целесообразных) путей достижения поставленной цели. В теории исследования операций смотрят на проблему как на математическую задачу. Эта задача сначала должна быть абсолютно четко сформулирована. Лишь после того как задача сформулирована и доведена до формы математической модели, возникает вопрос выбора математического метода ее решения, т.е. применения аппарата исследования операций.

Математическая модель операции позволяет оценить эффективность различных вариантов достижения цели операции. Для выявления наилучшего варианта необходим соответствующий алгоритм поиска.

Алгоритм – это точное предписание выполнить строго в определенном порядке систему действий для решения задач некоторого класса. Алгоритм должен удовлетворять требованиям определенности (быть точным и однозначным, не допускать произвола в действиях), массовости (быть универсально применимым для всех задач данного класса, хотя начальные условия отдельных задач можно варьировать в известных пределах) и результативности (приводить к решению за конечное число действий). Таким образом, алгоритм гарантирует, что, если задача имеет решение, то осуществляя заданную последовательность действий, обязательно будет найдено это решение.

Все многочисленные модели исследования операций являются формально-математическими моделями. Эти модели универсальны в том смысле, что одна и та же модель (например, модели математического программирования) может служить математическим описанием самых разнообразных физических, экономических и т.п. объектов и процессов. Алгоритмы и машинные программы решения задач с использованием формально-математических моделей не связаны непосредственно с физической (или экономической, военной) сущностью этих объектов или процессов. Физическая или иная интерпретация привносится в модель извне непосредственно лицами, строящими и использующими модель для принятия решений. Таким образом, использование методов исследования операций позволяет строить универсальные в указанном смысле формально-математические модели, которые сами по себе смысла (семантики) предстоящей операции не отражают. Эти модели синтаксического уровня.

В исследовании операций можно выделить следующие основные направления:

- создание и описание способов действий, которые могут вести к достижению цели (среди них необходимо производить выбор наилучших способов);

- построение математических моделей для принятия решений, учитывающих сложный (системный) характер реальных объектов и факторы неопределенности, т.е. создание модели операции, дающей математическое описание цели (в виде целевой функции), процесса и результатов проведения операции;

- оценивание и сравнение эффективности конкурирующих способов действий на основе созданной модели;

- разработку понимания оптимального выбора действий и математических методов поиска их, т.е. изучение и выбор математических методов нахождения оптимальных (рациональных) решений этой модели.

Имея много общего между собой как два направления системных исследований, базирующихся на системном подходе, системный анализ и исследование операций в то же время отличаются друг от друга. Отличие этих двух направлений системных исследований проявляется в их отношении к процессу формулирования целей.

При применении методов исследования операций вопросы о постановке цели операций остаются в стороне. Неявно предполагается, что цель операции кем-то задана и задача заключается в том, чтобы разработать предложения по плану операции, используя математические методы. Такая постановка задачи не случайна. Дело в том, что формулировка целей процесс творческий, почти целиком относящийся к неформальной части принятия решений (к формальной части относится применение методов исследования операций).

Проблема формулирования цели операции – это проблема концептуального характера, т.е. проблема, решаемая на уровне идей и имеющая явно выраженный творческий характер. При решении концептуальных проблем наибольший вес имеют формально-математические методы, а эвристические процедуры (хотя первые здесь также очень важны) играют вспомогательную роль как средство, облегчающее и организующее эвристическую деятельность. По своей сущности формулировка цели операции не может быть отнесена к исследованию операций как теории математических моделей принятия решений, т.е. определение цели лежит вне исследования операций как научного направления системных исследований. Процесс обоснования и постановки целей является важнейшим элементом системного анализа и по существу составляет предмет его исследования.

Эвристические процедуры, применяемые в системном анализе для формулирования целей, основаны на учете опыта решения сходных задач в прошлом, учете ошибок, а также интуиции. Они не предназначены для получения точных решений, их главное назначение – определение стратегии поиска приблизительных решений. В последнее время, однако, наряду с дальнейшим совершенствованием эвристических процедур, серьезное внимание уделяется разработке формализованных процедур решения концептуальных проблем, в том числе и таких, как анализ и выбор целей операции, выявление совокупности показателей, характеризующих исходы операции, выделение из их числа наиболее важных и т.д. Иными словами, теперь ставится и решается задача формализации эвристических процедур. Изучение этих вопросов составляет содержание так называемой *неформальной теории принятия решений*.

Системный анализ неотделим от процесса целеобразования и планирования операций. Он претендует на более широкий, чем исследование операций, подход, включающий обоснование и выбор целей, на достижение которых следует израсходовать имеющиеся ресурсы. Если в исследовании операций возникает лишь вопрос о том, как достичь определенной цели, необходимость постановки которой не подвергается сомнению, то в системном анализе, прежде всего, требуется ответить на вопрос; на какие цели следует использовать имеющиеся ресурсы.

В настоящее время процесс постановки целей получает научное обоснование в виде системного анализа, тогда как исследование операций, оставляя в стороне этот процесс, занимается разработкой предложений по способам достижения цели операции, используя математические методы.

3.4.2. Структурный подход и структурный анализ

В системных исследованиях наряду с совместным применением всех аспектов системного подхода (системно-компонентного, системно-структурного, системно-функционального и системно-интегративного) рассматриваются также и отдельные аспекты или некоторые их комбинации. Весьма распространенным в практике научных исследований сложных военно-технических систем является структурный подход.

Структурный подход направлен на раскрытие структуры объекта, выявление существенных связей между компонентами, определение места, роли и значимости компонентов в объекте, вскрытие факторов существования целого. Методическим

средством реализации структурного подхода является *структурный анализ*, лежащий в основе структурных исследований. Он предполагает выполнение следующих действий:

построение структурной модели систем с помощью ее структурной схемы, позволявшей перейти от содержательного описания системы к математическому;

выбор показателей качества структуры системы и разработка методики их определения;

оценивание качества структуры системы и определение значимости элементов системы и связей между ними;

разработка рекомендаций по совершенствованию структуры системы.

Структура системы – это относительно устойчивая организация из отдельных элементов с их взаимосвязями, которые обусловлены распределением функций и целей, выполняемых и достигаемых системой в целом и ее отдельными компонентами. Качество структуры определяется числом, значением, формой и содержанием ее составных частей, а также местом, которое они занимают в целом, и существующими между ними отношениями. Структура наглядно отображает, как устроен объект – из каких частей он состоит и как эти части связаны друг с другом.

Одной из форм математического описания структуры является граф. Вершины графа отождествляются с элементами объекта (на принятом уровне детализации), а дуги и ребра графа – со связями между соответствующими элементами. Инженерная форма отображения структуры – схема. Схема и граф тождественны по своему содержанию, но различаются по форме. В схемах для обозначения элементов используют различные геометрические фигуры стандартного вида, разнообразие форм которых облегчает чтение схем.

Структура объектов определяется природой входящих в них элементов и физической реализацией связей между ними в составе объекта. При абстрагировании от физической сущности элементов и связей между ними получается модель объекта в виде его структурной модели, отображающей некоторую совокупность отношений. Изучением таких абстрактных моделей занимается математическая теория отношений, рассматривавшая свойства отношений, их классификацию, операции над отношениями, различные формы представления отношений. Задать отношение – это значит указать, между какими элементами множества A оно выполняется.

Множество A , на котором отношение определено, называется *областью задания отношения*. Упорядоченные пары элементов (a_i, a_j) , т.е. элементы множества $A \times A$, для которых выполняется заданное отношение, образуют подмножество R прямого произведения $A \times A$. Отсюда следует общее определение: отношение на множестве A есть подмножество R пар из множества $A \times A$. Содержательный смысл такого определения состоит в том, что выбор подмножества R во множестве $A \times A$ определяет, какие пары находятся в данном отношении. Если пара (a_i, a_j) входит в R , т.е. $(a_i, a_j) \in R$, то пишут $a_i R a_j$, что читается так: a_i находится в отношении R с a_j .

Отношение – это конструкция $\langle A, R \rangle$, $R \subseteq A \times A$, A – множество, на котором определено отношение, а R – множество пар, для которых это бинарное отношение выполнено. Множество пар R называют графиком отношения $r = \langle A, R \rangle$. Определе-

ние бинарного отношения, заданного на множестве A , обобщается и для случая множественных отношений.

Так как графики отношений являются множествами, то над ними можно производить по обычным правилам теоретико-множественные операции объединения, пересечения, взятия разности. К графикам отношений так же, как и к множествам, применимы понятия равенства и включения. Поскольку операции объединения, пересечения и взятия разности отношений возникли из соответствующих теоретико-множественных операций, то все их свойства в точности таковы, как у теоретико-множественных операций. В отличие от обычных множеств, для графиков бинарных отношений вводятся еще операции инверсии и композиции.

Каждому бинарному отношению, заданному на конечном множестве A , единственным образом может быть сопоставлен граф отношения, представляющий собой орграф, вершины которого соответствуют элементам множества A , а дуги - парам графика R данного отношения. Матрица с булевыми элементами $M(R)$, представляющая это отношение (график отношения R), называется также матрицей смежности графа, так как появление единицы на пересечении i -й строки и j -го столбца этой матрицы означает, что вершины a_i и a_j соединяются дугой, т.е. являются смежными.

Отношения могут обладать различными свойствами

элементарными: рефлексивностью (антирефлексивностью), симметричностью (антисимметричностью), транзитивностью (антитранзитивностью), полнотой (неполнотой), цикличностью (ацикличностью), связностью (несвязностью);

комбинированными: толерантностью, эквивалентностью, порядком (нестрогим, строгим, частичным, линейным и т.д.) и другими свойствами, позволяющими выделять существенные классы отношений.

Совместное использование теории отношений, теории булевых матриц и теории графов создает широкие возможности для проведения анализа структурных свойств систем математическими методами.

При разработке и исследовании технических систем обычно решаются задачи анализа и синтеза их структуры.

В формализованной задаче синтеза структуры выделяются:

P – множество возможных принципов $\Pi \in P$ построения системы или ее элементов;

F – множество взаимосвязанных функций, выполняемых системой и ее элементами;

A – множество возможных взаимосвязанных элементов системы.

Каждому набору принципов Π построения системы соответствует некоторое множество функций $F(\Pi)$, из которого при проектировании системы необходимо выбрать подмножество $f \in F(\Pi)$ достаточное для реализации выбранных принципов построения Π . Элементы множества F при проектировании отображаются на моменты множества A . Это отображение характеризуют некоторым оператором H : $A = H(F)$.

В общем случае задача синтеза структуры состоит в определении множества принципов построения $\Pi \in P$, множества функций, выполняемых системой ($f \in F(\Pi)$), множества элементов, способных реализовать выбранные принципы и

выполнить функции ($a \in A$), а также в определении оптимального отображения элементов множества на элементы множества a , обеспечивавшего требуемые характеристики функционирования системы, т.е. в нахождении:

$$\Pi \in P; \quad (3.1)$$

$$f \in F(\Pi); \quad (3.2)$$

$$(a \in A); \quad (3.3)$$

$$[a \in A] = H[f \in F(\Pi)]. \quad (3.4)$$

Если заданы принципы построения системы, то задача синтеза структуры состоит в определении (3.1)–(3.4); если заданы принципы построения системы и выполняемые ее функции, то в определении (3.3), (3.4); если заданы принципы построения системы, выполняемые ею функции и элементы системы (элементарная база), то в определении (3.4), т.е. рационального отображения множества выполняемых функций на множество взаимосвязанных элементов.

Если для некоторых элементов возникают проблемы большой загрузки, то условия (3.1)–(3.4) должны учитывать правила функционирования элементов. В ряде случаев эти правила определяются при решении задачи синтеза, поскольку от них может зависеть распределение функций и взаимосвязей в системе.

Общая задача структурного анализа состоит в том, что исходя из заданного описания элементов системы и непосредственных связей между ними получить заключение о структурных свойствах системы в целом и основных ее подсистем. Одной из задач структурного анализа является построение наглядной формальной модели, отображавшей систему отношений элементов объекта, как между собой, так и с внешней средой.

Структурная модель сложного объекта чаще всего является многоуровневой, причем конкретизация структуры дается на стольких уровнях, сколько требуется для создания полного представления об основных структурных свойствах объекта. Эти свойства описываются набором характеристик или показателей, позволяющих оценивать качество структуры. Если изобразить техническую систему как совокупность блоков (модулей), осуществлявших некоторые функциональные преобразования, и связей между ними, то получим структурную схему. Помимо функциональных, в структурную схему включаются логические блоки, позволявшие изменять характер функционирования в зависимости от того, выполняются или нет некоторые заранее заданные условия.

Структурная схема наглядна, однако она еще не является математической моделью структуры и с трудом поддается формализованному анализу. Эта схема служит скорее естественным мостиком, облегчавшим переход от содержательного описания системы к математическому, чем действительным инструментом анализа и формирования структуры системы. Отношения между элементами структуры могут быть представлены соответствующим графом, что позволяет формализовать процесс наследования структурных свойств системы и использовать хорошо развитый математический аппарат теории графов.

Принцип представления структуры в виде графа весьма прост. Элементам системы при решении одних задач ставят в соответствие ребро графа, а связям –

вершины графа. При решении других задач поступают иначе: элементам ставят в соответствие вершины графа, а связям – ребра графа. Граф, полученный в первом случае, называется реберным, во втором случае – вершинным.

Представление структуры системы в виде графа еще ничего не позволяет сказать относительно ее качества. Для проведения структурного анализа систем необходимо ввести различные параметры и показатели качества структуры системы, а также располагать методикой, позволяющей определять структурные характеристики системы и давать им количественную оценку.

Показатели, характеризующие качество структуры, должны быть простыми и не требовать для своего определения данных больше, чем их содержится в структурной схеме. К числу основных свойств, определяющих качество структуры относят: связность структуры, структурную избыточность, структурную компактность, централизацию структуры, сложность структуры, значимость элементов и др.

Характеристики, типичные для структуры различных систем, могут быть разделены на две группы. К первой группе относятся характеристики, связанные с иерархичностью систем: число уровней (подсистем) рассматриваемой системы; характер взаимосвязей между уровнями (подсистемами); степень централизации и децентрализации в управлении; признаки разбиения системы на подсистемы. Ко второй группе – показатели качества системы той или иной структуры (например, показатели живучести, надежности, способности к перестройке и т.д.). Показатели второй группы дополнительно учитывают неструктурную информацию.

Структурный анализ считается необходимым этапом общего исследования систем. Требуя для своего проведения минимум исходной информации – структурную схему и соответствующую ей модель, он позволяет в принципе сформулировать рекомендации, обеспечивающие функциональную разгрузку отдельных элементов, усиление слабых звеньев системы введением структурной и функциональной избыточности, выработать предложения, позволяющие разумно распределить усилия для обеспечения и достижения заданного качества системы. Проведение структурного анализа позволяет получить сведения о значимости и степени «нагруженности» элементов систем, т.е. выявить ее «слабые» места, чтобы в дальнейшем обратить на них особое внимание с целью обеспечения требуемых технических характеристик системы.

3.4.3. Функциональный подход и анализ

Функциональный подход к исследованию систем основан на рассмотрении анализируемой системы не в ее конкретной, реальной форме, а как комплекса функций, которые она выполняет или должна выполнять и которые обуславливают ее полезность. Важность и целесообразность функционального подхода определяется тем, что потребителя в конечном итоге интересует не само конкретное воплощение системы, а ее функции.

Совокупность всех функций системы в целом и ее компонентов с их отношениями образует функциональную структуру системы, которая строится по иерархическому принципу: выполнение функций более высокого уровня обеспечивается совокупностью частных функций предшествующего уровня, которые, в свою оче-

редь, обеспечиваются функциями более низкого уровня и т.д., вплоть до элементарных функций, реализуемых отдельными элементами системы.

Функционировать – значит реализовывать функцию, т.е. получать результаты, предписанные назначением системы. Функции, которыми обладает или должна обладать анализируемая система как единое целое, называют *общесистемными*, а функции компонентов системы – *внутрисистемными*.

По роли удовлетворения потребностей общесистемные функции делятся на основные, определяющие назначение системы, и второстепенные, отражающие побочные цели ее создания. Системы, выполняющие одну основную функцию, называются однофункциональными, а выполняющие несколько основных функций – многофункциональными.

Требования вышестоящей системы (потребителя) определяют требуемые (необходимые) функции анализируемой системы. В отличие от требуемых функций существуют реальные функции, т.е. те действия, которые может выполнять система в силу того, что она обладает определенными свойствами. Функции, непосредственно не связанные с основным назначением системы, способствующие осуществлению основных функций и сделавшие их выполнение более рациональным и экономичным, называются вспомогательными.

Анализ функций включает формулирование функций, выяснение состава функций, отнесение их к основным, вспомогательным и ненужным, а также установление их взаимных связей. Цель анализа функций заключается в иерархическом разделении системы на функциональные элементы, описании их функций и построении функциональной структуры системы. Реализуя принцип последовательности в проведении анализа функций, сначала необходимо сформулировать функции системы в целом, а затем уже функции ее составляющих компонентов.

Одной из целей исследования систем является получение представления о том, насколько хорошо выполняются системой ее функции. В связи с этим вводится понятие *качества исполнения функций*. Оно может быть оценено рядом показателей, которые могут быть частными (относящимися к одному свойству) и комплексными (характеризующими несколько свойств).

Анализ функций системы завершается построением ее функциональной структуры, которая, как правило, представляется в виде графа функционального взаимодействия элементов системы и объектов, на которые направлено ее действие. Вершины у графа изображают функциональные элементы, а дуги – функции элементов. Дуги выходят из вершин – элементов, функции которых они описывают, и заканчиваются в вершинах – моментах, работу которых они обеспечивают, или в вершинах-объектах, куда направлено действие системы. Если элемент имеет несколько функций, то из соответствующей вершины будет выходить это же число дуг-функций.

При построении функциональной структуры функциональные элементы системы распределяются по уровням. Вершины графа функциональной структуры располагают по горизонтальным рядам в соответствии с уровнями изображаемых элементов.

Для сложных систем, состоящих из большого числа элементов, функциональные структуры получаются весьма громоздкими и труднообозримыми. В таких случаях целесообразно проводить декомпозицию функциональной структуры, разделяя ее на отдельные фрагменты.

Системные исследования должны базироваться на рассмотрении в единстве функций и структуры системы. Функции, какова бы ни была их природа, можно реализовать лишь в структуре и объяснить с помощью структуры. Можно построить множество структур, реализующих одну и ту же функцию. Поэтому возникает задача выбора целесообразной или наиболее предпочтительной в каком-то смысле структуры, реализующей ту или иную функцию. Полнота исследования системы может быть обеспечена в случае, если анализ функций будет дополняться структурным анализом.

Процесс выявления функций и процесс разработки систем должны непрерывно сопутствовать друг другу. По мере развития этих процессов идет непрерывное уточнение как конструкции системы, так и содержания функций. Функция способствует выявлению конструктивных вариантов, ее реализующих, а выбор конструктивного варианта, в свою очередь, порождает функции более конкретного содержания.

При проектировании систем сначала формулируются требуемые общесистемные функции, а затем решаются задачи поиска вариантов решений для выполнения функций. Для этого выдвигаются схемы построения системы, позволяющие реализовать общесистемные функции. В процессе анализа альтернативных схем получают их сравнительные оценки, принятие решения означает выбор наилучшей схемы с помощью полученных оценок.

После выбора схемы формулируют внутрисистемные рабочие функции. Имея схему изделия и вытекающий из нее состав рабочих функций, разрабатывают варианты конструктивных решений, оценивают эти варианты и выбирают наилучший, в котором функции реализуются качественно и со сравнительно небольшими затратами. Как только выбрано конструктивное решение, на его основе появляется возможность формулировать вспомогательные функции, необходимые для реализации рабочих функций, связанных с непосредственным применением системы.

Целесообразно проводить анализ функций на основе детального изучения не только сформулированных и зафиксированных в документации требований к системе, но и путем выявления дополнительных функций, в которых нуждается или будет в перспективе нуждаться потребитель, а также функций, которые не нужны для данной системы.

Выявляя функции, реализуемые системой, определяют некоторую абстрактную систему, о которой известно только то, что она будет делать. В связи с этим, этап синтеза функций называют абстрактным синтезом, а этап порождения структуры, реализующей заданные функции, структурным синтезом.

Любой способ порождения функций, достаточных для достижения определенной цели (совокупности результатов), называют *способом функциональной организации*. Способ построения структуры системы из набора элементов, обеспечивавшей реализацию функций определенного класса, называют *способом структурной организации*. Определяя способ функциональной организации, выявляют

класс функций, присущих системам определенного назначения (безотносительно к средствам, необходимым для реализации этих функций), а определяя способ структурной организации, выявляют правило построения структур, реализующих выбранный класс функций, т.е. отвечающих некоторому назначению.

В общем случае организация сложных систем представляет собой процесс упорядоченного расположения множества элементов с учетом их логических связей с целью осуществления определенных функций в сложных системах. Обычно к одной и той же цели можно прийти различными способами, исходя из различных принципов организации систем. Каждый принцип организации задает определенный способ построения множества систем, аналогичных по назначению, но различных по функциям и структурам. Конкретная система представляет собой лишь пример реализации некоторого способа организации. Таким образом, организация – понятие более высокого ранга, чем функция и структура, это модель, на основе которой могут строиться многие конкретные системы и подсистемы.

4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

4.1. Основные принципы проектирования систем ВВТ

Основная цель проектно-исследовательских работ состоит в том, чтобы в заданный срок получить проект системы, обладающей максимальной ожидаемой эффективностью применения по назначению в условиях ограничения ресурсов на ее создание и эксплуатацию. Проектно-исследовательские работы начинаются с установления необходимости создания новой системы и заканчиваются разработкой проектов элементов системы и испытанием опытных образцов этих элементов.

Проектно-исследовательские работы могут быть разделены на три этапа по трем иерархическим уровням их выполнения, отличающимся целями работ, постановкой задач, методами исследований, результатам работ.

Первый этап (этап планирования разработки системы) выполняется заказчиком системы. Включает тактико-технико-экономическое обоснование системы. Имеет целью разработку наиболее общих требований к системе. Этап начинается с установления необходимости и целесообразности создания новой системы, формирования ее назначения и решаемых задач. На этом этапе определяются основные ограничения на технические, организационные и экономические факторы, при которых в дальнейшем будет разрабатываться система. Цель системы формулируется на вербальном уровне. Предварительно анализируются потребности в системе и возможности ее создания, предоставляемые современным уровнем развития науки и техники. При этом учитываются результаты прогнозирования дальнейшего развития близких по назначению и решаемым задачам систем. Результаты исследований, полученные на первом этапе, позволяют приступить к следующему (второму) этапу проектно-исследовательских работ.

Второй этап (проектирование системы) выполняется разработчиком в условиях, когда к проектируемой системе уже предъявлены отдельные требования и определены ограничения. Задача проектирования состоит в формулировании требований и ограничений, при которых будет происходить проектирование элементов системы. Для этого уточняются облик системы, структурное построение и тип каждого элемента, устанавливаются диапазоны изменения основных характеристик элементов, обеспечивающие выполнение системой своих функций в соответствии с ее целевым назначением. Итогом работ на втором этапе является проект системы и технические задания на проектирование ее элементов.

На первых двух этапах производится обоснование и проектирование системы в целом.

Третьим этапом (завершающим) является этап проектирования подсистем и элементов системы. Основой для проведения завершающего этапа проектирования служит проект системы в целом, который дает исходные данные для проектирования ее подсистем и элементов, содержит требования к структуре и параметрам подсистем и элементов, а также ограничения, накладываемые на них. В отличие от проектирования системы в целом на этапе проектирования подсистем и элементов (третий этап) необходимо принимать конкретные проектировочные решения с учетом всех конкретных факторов и условий, в той или иной степени влияющих на функционирование подсистемы или элемента.

Проектирование рассматривают как последовательность подготовки и принятия проектных решений, приводящую к созданию технических объектов, удовлетворяющих заданным требованиям. Проектирование начинается с выдачи задания на проектирование в виде определенных документов и является первичным описанием объекта. Результатом проектирования служит комплект документации, содержащий достаточные сведения для изготовления объекта в заданных условиях. Эта документация представляет собой окончательное описание объекта в виде полного комплекта схемной, конструкторской и технологической документации, предназначенной для использования в процессе изготовления и эксплуатации проектируемого объекта.

Проектирование – это процесс составления описания, необходимого для создания объекта, который осуществляется преобразованием первичного описания (тактико-технического задания) оптимизацией характеристик объекта и алгоритма его функционирования, устранением некорректности первичного описания и последовательным представлением описаний детализируемого объекта на различных языках для разных этапов проектирования. Проектирование связано с выполнением двух основных работ:

- 1) выбор технических решений;
- 2) отображение этих решений в виде совокупности документов для изготовления объекта в процессе производства.

Проектирование как один из видов инженерной деятельности обладает рядом специфических особенностей:

продуктом проектирования является модель объекта, реально не существующего в период проектирования;

процедуры проектирования объекта представляются как процедуры преобразования его исходного описания;

проектируемый объект входит в упорядоченную иерархию объектов и выступает одновременно и как часть системы более высокого уровня, и как система для объектов более низкого уровня; в связи с этим процесс проектирования состоит из внешнего проектирования (объект – часть системы более высокого ранга) и внутреннего проектирования (объект – совокупность компонентов);

проектирование носит итерационный характер.

Преобразование исходного описания объекта в окончательное описание осуществляется на основе выполнения комплекса работ исследовательского, расчет-

ного и конструкторского характера. Оно порождает промежуточные описания, которые являются предметом рассмотрения с целью определения окончания проектирования или выбора путей его продолжения. Процесс проектирования сложной системы как процесс принятия решения принято делить на внешнее проектирование и проектирование внутреннее.

Для *внешнего проектирования* основной проблемой является формулирование целей, для достижения которых создается система, и задач, которые она должна решать в процессе функционирования, чтобы обеспечить достижение поставленных целей, а также предъявление требований к основным характеристикам системы, выполнение которых обеспечивает решение задач. Основа внешнего проектирования – правильный учет современного состояния техники, возможностей технологии, обоснованный прогноз их развития на период времени, не меньший планируемой продолжительности жизненного цикла системы. Наряду с техническими факторами необходимы учет экономических факторов, прогноз стоимости системы и сроков ее разработки и изготовления. На основе изучения состояния и перспектив научно-технического прогресса формулируется первоначальный вариант тактико-технического задания на систему.

Проблема *внутреннего проектирования* состоит в том, чтобы реализовать в виде комплекса технических устройств, узлов и агрегатов, составляющих систему, основные технические параметры, которые обеспечат системе требуемые свойства и характеристики. Часто требования, вытекающие из внешнего проектирования, противоречат возможностям внутреннего проектирования. Выражается это в том, что либо они завышены и поэтому не выполнимы, либо занижены и не используют всех достижений научно-технического прогресса. Возникает проблема формирования такого облика системы, при котором требования внешнего проектирования оказались бы корректно согласованными с возможностями внутреннего проектирования. Решается задача отбраковки заведомо плохих вариантов системы и образования множества возможных вариантов, среди которых надо будет искать вариант, обеспечивающий достижение целей, сформулированных при внешнем проектировании. Этап формирования облика системы дает возможность генерации множества эффективных вариантов системы при сужении множества всех возможных вариантов. Окончательный выбор варианта системы из множества эффективных вариантов облегчается тем, что на этот этап выбора представляется заранее просеянное множество вариантов.

В процессе взаимодействия внешнего и внутреннего проектирования первоначально рождается облик системы, который затем воплощается в проектные решения. При внешнем и внутреннем проектировании происходит постановка и решение основной задачи проектирования – задачи синтеза технической системы, удовлетворяющей заданным требованиям.

Синтез – это процесс порождения функций, структуры и параметров системы по заданным ее свойствам, необходимых и достаточных для получения определенных результатов. Непосредственный синтез сложной системы является проблематичным. Поскольку не существует общих методов непосредственного синтеза сложных систем, в большинстве случаев синтез осуществляется путем анализа результатов многократных расчетов для различных вариантов построения системы и

условий ее применения с использованием моделей различной степени детализации и широты. Решение задачи синтеза сложной системы сводится к изучению и обобщению данных, полученных при анализе множества вариантов структуры и значений параметров системы. Оценив результаты вариантных расчетов с помощью установленных показателей качества и критериев принятия решений, выбирают предпочтительный вариант структуры и значений параметров сложной системы.

Таким образом, синтезом сложной системы можно назвать исследование, имеющее результатом рекомендации, необходимые для принятия решений по выбору структуры и параметров системы.

Процесс проектирования реализуется в соответствии с определенным планом, который представляется в виде логической схемы построения проекта. Общая технология проектирования сложных систем предусматривает предварительное, эскизное и техническое проектирование.

Реальная потребность в системе обуславливает постановку задачи проектирования, определяемую исходной ее формулировкой. При этом сущность задачи в этой формулировке часто оказывается выраженной недостаточно четко. Поэтому необходим этап уточнения задания для решаемой технической задачи, выделение функций проектируемой системы и выявление действительных ограничений, существующих при ее проектировании.

Поскольку поиск решений в случайно выбранном направлении обычно не приводит к нужному решению вводится специальный этап определения поиска, на котором из множества решений, полученных в результате поиска в установленном направлении, на основе тактико-технических показателей выбирается наиболее предпочтительное (конкурентоспособное) решение. Характерным для этапа *предварительного* проектирования (поиска) является отсутствие подробной структуризации системы, принятие решений по вопросам, относящимся к системе в целом. Этот этап является этапом формирования облика системы, устранения некорректности в требованиях тактико-технического задания и увязки требований внешнего проектирования с возможностями внутреннего проектирования. Результатом предварительного проектирования является техническое предложение (теоретические и экспериментальные прикладные НИР по изысканию перспективных принципов и путей создания новой системы).

На этапе *эскизного проектирования* производится уточнение и конкретизация структурной схемы системы, а также детальный анализ характеристик используемых технических средств. С этой целью решаются задачи инженерного синтеза и анализа системы. Основной задачей эскизного проектирования является уточнение параметров и характеристик системы, связанное с проектно-конструкторской проработкой ее основных подсистем и формированием их облика, осуществляемое на основе иерархической уровневой структуризации системы. Данный этап сопровождается проведением широкого комплекса расчетов, моделирования и экспериментальных исследований. Результатом этапа является эскизный проект.

На этапе *технического проектирования* глубина проработки проекта достигает уровня базовых элементов. Результатом этого этапа является технический проект.

Каждый из трех этапов включает как теоретические, так и экспериментальные исследования и завершается испытаниями лабораторных макетов (предварительное проектирование), экспериментальных (эскизное проектирование) и опытных (техническое проектирование) образцов.

Проектирование сложных систем основано на использовании ряда принципов, основными из которых являются декомпозиция и иерархичность описания объектов, многоэтапность и итерационность проектирования, типизация и унификация проектных решений и средств проектирования.

Введение иерархических уровней описаний проектируемых объектов обусловлено необходимостью согласования описания по сложности с возможностями восприятия человеком и возможностями оперирования процессами на этапе преобразования с помощью имеющихся средств проектирования.

Разделение описания по степени детализации отображаемых свойств и характеристик объекта лежит в основе блочно-иерархического подхода к проектированию и приводит к появлению *иерархических уровней* в представлениях проектируемого объекта. На верхнем уровне подлежащий проектированию сложный объект рассматривается как система, состоящая из ряда взаимосвязанных и взаимодействующих подсистем. На нижележащем уровне каждый компонент соседнего вышестоящего уровня представляется совокупностью взаимосвязанных компонентов, при этом степень подробности описания компонентов возрастает, объект проектирования рассматривается не в целом, а отдельными блоками. Такой подход позволяет на каждом уровне формулировать и решать задачи приемлемой сложности.

Как правило, выделение компонентов происходит по функциональному признаку. Разделение продолжается вплоть до получения на некотором уровне элементов, описания которых дальнейшему делению не подлежат. Такие элементы по отношению к проектируемому объекту называют *базовыми элементами*, а их совокупность – *элементной базой*. Существующее в единой системе конструкторской документации (ЕСКД) деление схем на принципиальные, функциональные и структурные отражает блочно-иерархический подход к проектированию.

Принципиальные схемы определяют полный набор базовых элементов и связей между ними и обычно дают детальное представление о принципах работы изделия.

Функциональные схемы разъясняют протекание процессов в изделии или его частях, т.е. дают представление о функционировании объекта с учетом только существенных факторов и функциональных частей.

Структурные схемы отражают наиболее общее и наименее детализированное представление об объекте, определяя основные функциональные части изделия, их назначение и взаимосвязи.

Таким образом, принцип иерархичности означает структурирование представлений об объектах проектирования по степени детальности описаний, а принцип блочности – разбиение представлений каждого уровня на ряд составных частей (блоков) с возможностями поблочного проектирования. Преимущества блочно-иерархического декомпозиционного подхода состоят в том, что сложная проектная задача большой размерности разделяется на последовательно решаемые задачи меньшей размерности.

Проектирование как процесс, развивающийся во времени, расчленяется на этапы, проектные процедуры и операции. Этап проектирования – часть процесса проектирования, включающая в себя формирование всех требующихся описаний объекта, относящихся к одному или нескольким иерархическим уровням. Составные части этапа проектирования называют проектными процедурами. *Проектная процедура* – часть этапа, выполнение которой заканчивается получением проектного решения. Каждой проектной процедуре соответствует некоторая задача проектирования, решаемая в рамках данной процедуры. Более мелкие составные части процесса проектирования, входящие в состав проектных процедур, называют *проектными операциями*. Примерами проектных процедур являются процедуры моделирования, оптимизации, прогнозирования, корректировки. Примерами операций могут быть отдельные вычислительные работы, составление таблиц с данными и т.п.

К этапам проектирования относятся: этап системного проектирования, этап функционального проектирования, этап конструкторского проектирования; этап технологического проектирования.

Внутри этапа возможна декомпозиция проектных работ как за счет расчленения объекта, так и необходимости рассмотрения его на различных уровнях иерархии. Для каждого этапа характерны свои методы декомпозиции. Между этапами устанавливаются определенные информационные связи.

Этап *системного проектирования* является начальным этапом, соответствующим эскизной проработке будущего объекта. Объект на системном этапе рассматривается как единое целое на абстрактном алгоритмическом уровне. В задачи этапа входят два класса задач: внутренние и внешние. К внутренним задачам относится отработка структуры объекта, системных алгоритмов, протоколов обмена информацией и интерфейса. К внешним задачам относятся задачи управления последующей обработкой, связанные с выработкой совокупности частных требований к элементам структуры, к определениям внешних условий функционирования элементов.

На этапе системного проектирования используются модели для расчета показателей качества объекта проектирования. В результате выполнения этого этапа синтезируются структуры, алгоритмы управления, а также формируются требования к элементам структуры и условия их функционирования.

Этап *функционального проектирования* предназначен для отработки структуры и функциональной схемы объекта для условий работы в реальной физической среде. Он связан с отображением основных принципов функционирования, характера физических и информационных процессов, протекающих в объекте. Это отображение находит выражение в принципиальных, функциональных, структурных, кинематических схемах и сопровождающих их документах.

Этап *конструкторского проектирования* обеспечивает конструкторское оформление всех решений, принимаемых на предыдущих этапах. Центральной задачей этапа является синтез геометрической модели объекта проектирования на основе проектных процедур. В состав проектных процедур входят операции компоновки, размещения, определения геометрических форм объектов, синтеза оригинальных деталей. Геометрическая модель отображает объект в элементах конст-

рукторского базиса в форме, удобной и достаточной для формирования полной конструкторской документации.

Этап *технологического проектирования* — это этап технологической подготовки производства. Он связан с описанием методов и средств изготовления объектов и обеспечивает формирование технологического процесса производства объекта на основе конструкторской документации с учетом имеющегося оборудования, инструмента и исходных заготовок. Технологический процесс представляет собой упорядоченную последовательность действий, элементами которой являются технологические операции изготовления и контроля.

Процессу проектирования сложных систем свойственна декомпозиция. Декомпозиция проектных работ может быть этапной, т.е. такой, когда один и тот же объект проходит ряд этапов, на каждом из которых решаются те или иные проектные задачи. Внутри этапа также возможна декомпозиция, предполагающая расчленение самого объекта на ряд самостоятельно проектируемых объектов. В инженерной практике декомпозиция по этапам связана с классификацией проектных работ, внутренняя декомпозиция — с классами аппаратуры или иерархии объектов.

При разработке системы может применяться как нисходящее, так и восходящее проектирование. Если решение задач высоких иерархических уровней предшествует решению задач более низких иерархических уровней, то проектирование называют нисходящим. Если же раньше выполняются работы, связанные с низшими иерархическими уровнями, проектирование называют восходящим. У каждого из этих двух видов проектирования имеются преимущества и недостатки.

При *нисходящем проектировании* система разрабатывается в условиях, когда ее элементы еще не определены, и, следовательно, сведения о возможностях и свойствах компонентов нижележащих уровней, используемые на вышестоящих уровнях, носят предположительный характер. Поэтому решение принимается в обстановке неполной информации, при не до конца определенных объектах. Оно может оказаться нерациональным и даже ошибочным. Могут быть приняты не реализуемые по технологическим, экономическим или иным соображениям параметры элементов, т.е. могут быть предъявлены невыполнимые для следующего нижележащего уровня требования.

При *восходящем проектировании*, наоборот, элементы проектируются раньше системы, и, следовательно, в требованиях к элементам не могут быть в полной мере отражены требования, вытекающие из вышестоящих уровней. В обоих случаях из-за отсутствия исчерпывающей исходной информации имеют место отклонения от потенциально возможных оптимальных технологических решений. Поскольку при проектировании сложных систем какой-либо приемлемой альтернативы блочно-иерархическому подходу не существует, разработка ведется в условиях указанных отклонений. Ошибки или нерациональные решения, выявленные при переходе на следующий уровень, должны устраняться через повторное выполнение предыдущих работ. Повторное выполнение проектных процедур обеспечивает последовательное приближение к оптимальным результатам и обуславливает итерационный характер проектирования. Следовательно, итерационность нужно относить к важнейшим принципам проектирования сложных систем.

На упрощение и ускорение проектирования ориентирован принцип типизации и унификации проектных решений и средств проектирования. Унификация целесообразна только в таких классах объектов, в которых из сравнительно небольшого числа разновидностей элементов предстоит проектирование и изготовление большого числа разнообразных систем. Именно эти разновидности элементов и подлежат унификации. Для сложных систем, состоящих из этих элементов, в каждом конкретном случае приходится заново выполнять многоуровневое иерархическое проектирование. В таких условиях целесообразно ставить вопрос не только об унификации изделий, а также и об унификации средств проектирования и изготовления, в частности, об унификации проектных процедур в рамках автоматизированного выполнения типовых проектных процедур, что позволяет более оперативно создавать проекты новых изделий.

4.2. Методы проектирования систем ВВТ

Решение проблем проектирования сложных технических систем требует применения комплексных методов исследования, позволяющих с единых позиций сравнивать различные варианты построения систем по совокупности их показателей качества и обеспечивающих выбор среди них наиболее предпочтительного варианта. Оптимальное решение задачи проектирования возможно лишь на основе всестороннего, целостного рассмотрения проектируемой системы и ее изменений в процессе взаимодействия с внешней средой, т.е. на основе системного подхода, при котором руководствуются следующими принципами:

1. Учет всех стадий жизненного цикла проектируемой системы, позволяющий создавать реализуемые, достаточно технологичные в производстве и эксплуатации, высокоэффективные в применении в течение продолжительного времени системы.
2. Учет истории и особенно перспектив развития систем данного и близких взаимодействующих или конкурирующих классов. Это необходимо для того, чтобы разрабатываемая система не оказалась морально устаревшей за короткий период времени.
3. Всестороннее рассмотрение взаимодействия системы с внешней средой, в том числе и активно противодействующей разрабатываемой системе.
4. Учет основных видов взаимодействия внутри системы, между ее частями: функционального, конструктивного, информационного, энергетического и др.
5. Учет взаимодействия между элементной базой и системотехникой. Необходимость этого учета следует из того, что развитие элементной базы вызывает развитие системотехники (появление новых принципов построения систем и улучшение их показателей качества); в свою очередь, развитие системотехники предъявляет новые требования к элементной базе и стимулирует ее развитие.
6. Учет возможности изменения исходных данных и даже решаемой задачи в процессе проектирования, производства и эксплуатации системы. Отсюда вытекает необходимость вариации исходных данных (включая критерий качества) в процессе проектирования для оценивания степени их критичности и получения более надежных результатов проектирования. Обеспечение возможно большей универсальности применения проектируемой системы.

7. Выделение главных показателей качества, подлежащих улучшению в первую очередь. Стремление улучшить возможно большее число показателей качества (особенно на ранних стадиях проектирования) может привести к потере лучшего варианта, не говоря уже об излишнем увеличении длительности проектирования.

8. Сочетание принципов композиции, декомпозиции и иерархичности. Система может содержать огромное число элементов. Очевидно, невозможно одновременно оптимизировать все элементы даже с помощью самых совершенных вычислительных средств. Нужно объединить эти элементы в блоки, устройства, подсистемы и рассматривать каждый блок (устройство, подсистему) как единое целое, т.е. производить композицию элементов. Однако обычно не удастся сколь-нибудь сложную систему рассматривать как один объект, приходится разбивать ее на ряд подсистем, т.е. производить декомпозицию. Декомпозиция особенно необходима, если разработку отдельных подсистем приходится поручать различным организациям. В результате композиции и декомпозиции систему представляют рядом иерархических уровней, каждый из которых может содержать ряд частей (подсистем, устройств, блоков).

Сочетание композиции, декомпозиции и иерархичности позволяет существенно упростить не только проектирование системы, но и ее производство и эксплуатацию. Однако при декомпозиции системы на подсистемы необходимо формулировать исходные данные для проектирования каждой подсистемы таким образом, чтобы они достаточно полно и правильно учитывали все основные виды взаимодействия между подсистемами в процессе выполнения системой своих функций в соответствии с целевым назначением. Особое внимание при этом должно быть уделено обоснованию критерия качества каждой подсистемы. В противном случае подсистема, оптимальная в смысле ее критерия качества, может оказаться далеко не оптимальной или вообще не приемлемой с точки зрения критерия качества системы в целом.

9. Вскрытие основных технических противоречий, препятствующих улучшению качества системы и ускорению процесса ее разработки, а также отыскание приемов их преодоления.

10. Правильное сочетание различных методов проектирования, в первую очередь математических, эвристических и экспериментальных, а в рамках математических методов – аналитических и численных, реализуемых вычислительными средствами.

11. Обеспечение должного взаимодействия в процессе проектирования специалистов различных уровней и профилей.

В области оптимального проектирования принципы системного подхода обобщенно могут быть сформулированы следующим образом:

1. Система, состоящая из оптимальных частей, не является в общем случае оптимальной, поэтому система должна оптимизироваться в целом, как единый объект с заданным целевым назначением. Однако в ряде случаев оптимизация в целом невозможна или затруднительна из-за сложности или неопределенности математической модели системы, и тогда ничего не остается, как оптимизировать систему по частям и надеяться на то, что результат будет не очень далек от оптимального. Последний путь решения задачи проектирования упрощает разработку системы и часто приводит к удовлетворительным результатам. Однако необходимо

всегда иметь в виду, что оптимизация системы по частям в общем случае не эквивалентна оптимизации всей системы в целом.

2. Система должна оптимизироваться в соответствии с единым критерием.

3. Система оптимизируется в условиях ограничений на оптимизируемые параметры. Это означает, что оптимальность системы всегда относительна, условна. Достаточно изменить условия оптимизации, чтобы изменить оптимальный проект системы.

Оптимизация при разработке включает в себя оптимизацию как собственно разрабатываемой системы, так и процесса ее разработки. Обе эти стороны оптимизации взаимно связаны.

Показатели качества разработанной системы существенно зависят от степени оптимальности процесса разработки и от отпущенных на нее времени и средств, затрачиваемых на разработку системы, а сам процесс разработки в значительной степени определяется структурной схемой системы и значением ее параметров.

Задача оптимизации системы может быть сформулирована следующим образом:

найти такую систему, которая удовлетворяет совокупности исходных данных (в виде набора условий применения системы и ограничений на ее структуру и значения параметров) и обладает при этом значением векторного показателя качества, наилучшим в смысле заранее выбранного критерия предпочтения (критерия оптимальности системы).

В процессе проектирования систем используются математические, эвристические и экспериментальные методы.

При применении *математических методов* совокупность исходных данных представляется в математической форме, т.е. составляется математическое описание условий применения системы и значения ее параметров, частных показателей качества и критерия качества системы. Математически представляются зависимости частных показателей качества от структуры системы и значений ее параметров при заданных условиях применения проектируемой системы. Для полученного таким образом описания отыскивают математическими методами анализа и синтеза алгоритмы функционирования и параметры системы, удовлетворяющие выбранному критерию качества.

Математические методы, включая расчеты, математическое моделирование и автоматизированное проектирование, являются весьма мощным инструментом проектирования. Однако они предполагают наличие вполне определенного математического описания, которое, во-первых, требует экспериментальной проверки и, во-вторых, существует в необходимом объеме далеко не на всех этапах проектирования. Для выбора и обоснования математического описания, а также для решения ряда дополнительных задач проектирования требуется эвристическая деятельность коллектива разработчиков и проведение экспериментальных исследований.

Эвристические методы свойственны творческой деятельности, которая не поддается математической формализации. Они основаны на разных эвристических приемах, обобщающих опыт, интуицию и здравый смысл. Эвристический подход в процессе проектирования необходим при решении следующих задач:

выбор и формулировка цели проектирования;

выбор физических принципов действия системы;
обоснование математических моделей системы, полезных и мешающих воздействий;

выбор методов математического и экспериментального исследования;

выбор элементной базы;

трактовка результатов исследования и принятие окончательных решений.

Эвристическая деятельность опирается на имеющийся опыт в разработке подобных систем или решении подобных задач и на результаты теоретических и экспериментальных исследований, проводимых в процессе проектирования.

Экспериментальные методы проектирования прежде всего основаны на методах макетирования. На макете (физической модели) определяется выполнение условий работоспособности, производится изменение внутренних параметров, частичное изменение структуры с целью улучшения свойств объекта. На макете, как правило, допустимы не любые изменения, так как цена ряда изменений слишком велика. Во многих случаях экспериментирование невозможно на достаточно высоких иерархических уровнях – здесь стоимость изготовления макета сопоставима со стоимостью изготовления опытного образца и согласиться на многократное изготовление образцов в итерационном процессе проектирования сложных систем нельзя.

Выбор метода проектирования должен производиться на основе следующих главных показателей:

качество проектирования;

стоимость проектирования;

сроки разработки;

число занятых специалистов-разработчиков.

Обычно используются в «разумном сочетании» математические, экспериментальные и интуитивно-эвристические методы проектирования.

Современное проектирование, в процессе которого используются различные среды автоматизированного проектирования, опирается на типовые проектные процедуры. Проектная процедура называется типовой, если она предназначена для многократного применения при проектировании многих типов объектов.

Различают проектные процедуры анализа и синтеза. Понятие «синтез» технической системы в широком смысле слова близко по содержанию к понятию «проектирование». Разница заключается в том, что проектирование означает весь процесс разработки системы, а синтез характеризует часть этого процесса, когда создается какой-то вариант (не обязательно окончательный), т.е. синтез как задача может выполняться при проектировании много раз, перемежаясь с решением задач анализа.

Анализ технических объектов – это изучение их свойств. При анализе не создаются новые объекты, а исследуются заданные. Синтез технических объектов нацелен на создание новых вариантов, а анализ используется для оценивания этих вариантов, т.е. синтез и анализ выступают в процессе проектирования в диалектическом единстве.

Процедуры анализа делятся на процедуры одно- и многовариантного анализа.

При *одновариантном анализе* заданы значения внутренних и внешних параметров и требуется определить значения выходных параметров объекта. Внутренние па-

параметры – это параметры элементов системы. К внешним параметрам относятся параметры внешней по отношению к объекту среды, оказывающие влияние на его функционирование. Выходные параметры – это показатели качества, по которым можно судить о качестве системы. Они зависят как от свойств элементов, так и от особенностей связи элементов друг с другом, определяемой структурой системы. Если структура системы задана, то ее выходные параметры зависят только от параметров элементов и внешних параметров. Если выходные параметры описывают систему с точки зрения заказчика, то внутренние параметры – с точки зрения разработчика. Таким образом, выходные, внутренние и внешние параметры – это величины, характеризующие соответственно свойства системы, элементов системы и внешней среды.

Многовариантный анализ заключается в исследовании свойств объекта в некоторой области пространства внутренних параметров. Такой анализ требует многократного выполнения одновариантного анализа. К типовым задачам многовариантного анализа относят:

- статистический анализ;
- анализ чувствительности.

Если решение задачи одновариантного анализа дает ответ на вопрос о том, выполняются ли условия работоспособности в заданном варианте структуры при номинальных значениях внутренних параметров, то решение задачи *статистического анализа* отвечает также на вопрос о том, с какой вероятностью будут выполняться условия работоспособности. Анализ чувствительности позволяет определить степень влияния внутренних и внешних факторов. Другое важное значение анализа чувствительности заключается в получении информации о том, какие управляемые параметры и в каком направлении следует изменять в процессе оптимизации. Степень влияния внутренних x_i или внешних z_l параметров на выходные параметры y_j количественно оценивают частными производными:

$$A_{ji} = \frac{\partial y_j}{\partial x_i} \text{ или } B_{ji} = \frac{A_{ji} \cdot x_{i\text{ном}}}{y_{j\text{ном}}},$$

где $x_{i\text{ном}}$ и $y_{j\text{ном}}$ – номинальные значения параметров; A_{ji} и B_{ji} – соответственно абсолютный и относительный коэффициенты влияния (коэффициенты чувствительности).

При наличии явных аналитических зависимостей выходных параметров от внутренних параметров коэффициенты влияния определяются дифференцированием этих зависимостей. В практике проектирования наиболее широко распространен метод анализа чувствительности, основанный на численном дифференцировании и называемый методом приращений. Сущность метода выражается соотношением

$$A_{ji} = \frac{\partial y_j}{\partial x_i} \approx \frac{y_j - y_{j\text{ном}}}{x_i - x_{i\text{ном}}} = \frac{\Delta y_j}{\Delta x_i}.$$

Для анализа чувствительности применяют также регрессионный метод. В уравнениях линейной регрессии выходного параметра y_j на параметры x_i

$$y_j = y_{\text{ном}} + A_{j1}x_1 + A_{j2}x_2 + \dots + A_{ji}x_i + \dots$$

Параметры регрессии A_{ji} имеют смысл абсолютных коэффициентов влияния x_i на y_j .

Процедуры синтеза делятся на процедуры структурного и параметрического синтеза. Целью *структурного синтеза* является определение структуры объекта – перечня типов элементов, составляющих объект, и способа связи элементов между собой в составе объекта. *Параметрический синтез* заключается в определении числовых значений параметров элементов при заданных структуре и условиях работоспособности объекта. Если среди вариантов структуры ищется не любой приемлемый вариант, а наилучший в некотором смысле, то задачу синтеза называют структурной оптимизацией. Расчет внутренних параметров (параметрический синтез), оптимальных с позиций некоторого показателя качества при заданной структуре объекта, называют параметрической оптимизацией.

В общем случае при разработке приходится сравнивать несколько различных вариантов построения системы. При этом сравнению различных вариантов и выбору наилучшего из них предшествует оптимизация каждого варианта, осуществляемая путем синтеза его оптимальной структуры и оптимизации его параметров. Поскольку проводить синтез структуры и оптимизацию параметров для весьма большого числа вариантов практически невозможно, необходимо сначала хотя бы на основе имеющихся априорных данных исключить из рассмотрения часть заведомо неподходящих вариантов.

Проектные процедуры анализа и синтеза взаимосвязаны между собой. Эта взаимосвязь имеет характер вложенности процедуры анализа в процедуру синтеза (параметрического синтеза) и процедуры оптимизации в процедуру синтеза, объединяющую синтез структурный и синтез параметрический.

Вложенность означает, во-первых, что анализ входит как составная часть в оптимизацию, а оптимизация – в синтез, во-вторых, что однократное выполнение процедуры оптимизации требует многократного решения задачи оптимизации. Такой же характер взаимодействия имеют процедуры анализа – однократный многовариантный анализ основан на многократном одновариантном анализе.

Последовательность этапов и проектных процедур, используемая при проектировании объекта, образует маршрут проектирования. Маршрут называют типовым, если он применяется при проектировании многих объектов определенного класса.

4.3. Методические основы исследований, выполняемых при планировании и разработке систем ВВТ

При использовании системного подхода к разработке технических систем на первый план выдвигают изучение условий, в которых будет работать система, исследование задач, стоящих перед системой, обеспечение взаимодействия с другими системами. Рассмотрение целей, для которых создается система, условий применения по назначению, взаимодействующих средств позволяет сформулировать тактико-технические требования (ТТТ), которым должна удовлетворять проектируе-

мая система, наметить в самых общих чертах ее структуру. Все это выполняется при внешнем проектировании системы.

Качество системы и эффективность применения ее по назначению характеризуется совокупностью показателей, входящих в состав тактико-технических характеристик системы (ТТХ). Очевидно, что в ТТХ и ТТТ должны использоваться одни и те же показатели. Система может считаться эффективной, если ТТТ обеспечены соответствующими значениями ТТХ. Обеспечение этих значений является задачей внутреннего проектирования, при котором уточняется структура и производится выбор параметров подсистем.

Если проектирование, выполняемое с позиций системного подхода, производится сверху вниз по иерархическим уровням, то нельзя гарантировать, что тактико-технические требования в этом направлении будут выполнены. Они могут оказаться невыполнимыми по экономическим или физическим соображениям. Последнее вызывает необходимость согласования ТТХ и ТТТ в процессе итерационного проектирования и уточнения ТТТ, если окажется, что по тем или иным соображениям отдельные требования невыполнимы.

Основным содержанием процесса проектирования является выбор или синтез технического решения. Техническое решение ищется на некотором множестве структур S , которые может создать разработчик системы, и на множестве значений параметров Ω_x (здесь S и Ω_x образуют множество альтернатив, на котором ищется решение).

Процесс проектирования является совокупностью операций синтеза технических решений и формирования документации, отражающей выбранные решения. Техническое решение представляет собой структуру S_0 и вектор параметров x_0 системы, найденный на множестве возможных структур и варьируемых параметров, отвечающие заданным критериям и среде функционирования системы.

Процедуры структурного и параметрического синтеза являются итерационными и образуют два цикла: внутренний цикл структурного синтеза и внешний цикл параметрического синтеза. Во *внутреннем цикле* на каждом шаге с помощью математической модели рассчитываются выходные показатели качества системы и осуществляется их анализ на соответствие установленным требованиям. *Внешний цикл* перебора (синтеза) структуры включает формирование модели и внутренний цикл синтеза параметров. Перебор структур и параметров производится до момента получения технического решения, удовлетворяющего заданным требованиям.

При неблагоприятном исходе – невозможности найти решение на обозримом множестве структур в пределах заданного пространства поиска – переходят к процедуре корректировки тактико-технического задания. В последнем случае возможны две альтернативы:

1) *альтернатива разработчика* – расширение пространства варьируемых параметров Ω_x за счет перевода ряда независимых параметров среды в разряд варьируемых и поиск новых структур за счет расширения множества S ;

2) *альтернатива заказчика* – уступка за счет снижения требований, предъявляемых к проектируемой системе. Проектно-исследовательские работы, выполняе-

мые при планировании разработки системы и непосредственном ее осуществлении, начинаются с постановки задач исследования. Сначала дается постановка задачи в первоначальном виде, затем выполняется некоторое ее расширение с целью лучшего понимания задачи и, наконец, производится некоторое ее сужение к задаче проектирования, позволяющее выбрать конкретные пути решения с учетом располагаемых сроков и ресурсов.

Первоначальная постановка задачи осуществляется в виде качественного описания предложений, основывающихся на некотором интуитивном представлении о необходимости планируемой к разработке системы, о необходимости выявления пути повышения качества существующей системы и эффективности применения ее по назначению при модернизации. Например, может быть предложено рекомендовать пути повышения эффективности системы ПВО, исследовав возможные варианты решения этой задачи. Содержательное изучение задачи в первоначальном виде позволяет лучше понять цель ее решения. Этому способствует рассмотрение расширенной задачи, состоящей из совокупности взаимосвязанных задач и содержащей первоначально поставленную задачу.

В качестве расширенной задачи может быть взята или задача более высокого уровня иерархии, или задача того же уровня, что и первоначальная, но охватывающая более широкий круг компонентов или факторов.

Изучение расширенной по сравнению с первоначально поставленной задачи представляет собой начальную стадию синтеза сложной системы, в ходе которой рассматриваются цели систем верхних уровней и приобретаются знания, необходимые для постановки непосредственно решаемой при проектировании системы задачи. Начальную стадию синтеза системы можно условно разделить на пять взаимосвязанных задач.

1. Исследование начинается с изучения цели вышестоящей системы и заданной цели планируемой к разработке системы. При этом возможно уточнение или корректировка первоначально поставленной цели, где под целью системы понимается желаемый результат, который необходимо получить при ее функционировании (применении), т.е. назначение системы. Возможные пути или средства достижения цели исследуемой системы (например, различные варианты структуры и значений параметров системы, а также различные способы применения системы) образуют альтернативные варианты.

2. Для сформированной цели выявляются альтернативные пути решения задачи синтеза системы. Вначале составляется перечень тех альтернатив, которые по предварительным соображениям могут быть использованы для решения поставленной задачи. В дальнейшем процессе исследования происходит отсев некоторых альтернатив и подключение новых. Далее исследование подразделяется на решение четырех взаимосвязанных задач. Одна из них – описание системы – представляет собой составление словесной (описательной) модели структуры системы. Эта модель должна содержать описание (схему) структуры исследуемой системы, перечень основных характеристик системы в целом и ее компонентов, а также схему, определяющую место данной системы в иерархии систем, обеспечивающих совместное достижение цели высшего уровня.

3. Далее дается описание условий работы системы в виде описаний условий работы системы во внешней среде. Указываются возможные варианты условий работы системы в виде описаний или сценариев, выявляются главные, определяющие факторы внешней среды, подлежащие учету, устанавливаются граничные условия для системы.

4. Разрабатывается логическая операционная модель системы, представляющая собой модель осуществления системой операции, которая включает последовательность действий и событий, происходящих в процессе достижения системой цели операции. Операционная модель определяет иерархию действий компонентов системы и тем самым иерархию целей и показателей качества, связывает действия компонентов системы с их характеристиками и характеристиками компонентов внешней среды. Она отражает различные события, которые могут иметь место в процессе операции, функции, выполняемые компонентами системы, показатели качества достижения событий, различные характеристики и параметры компонентов системы и внешней среды, различные взаимосвязи между событиями, компоненты системы и внешней среды с их характеристиками.

Логическая операционная модель, как и модель структуры системы, необходима в качестве основы для разработки в последующем математических моделей, используемых при непосредственном синтезе системы и решении других исследовательских задач. Она предназначена для выявления событий, необходимых для выполнения операции, компонентов системы, участвующих в этих событиях, и характеристик компонентов, влияющих на успешное завершение событий, окружающих условий, в которых эти события должны осуществляться.

5. Разделение на составные части рассматриваемой расширенной задачи. Декомпозиция задачи необходима при анализе расширенной задачи и при упрощении дальнейшего исследования путем решения частных задач, подчиненных задачам вышестоящих уровней иерархии.

Начальная стадия синтеза системы завершается формулированием постановки решаемой задачи. Целью этого является определение облика системы: ее основных тактико-технических, технико-экономических и эксплуатационных характеристик. Указанные данные необходимы для назначения тактико-технико-экономических требований, предъявляемых к создаваемой системе и оформляемых в виде тактико-технического задания на ее разработку.

Синтез системы начинается с определения в первом приближении цели системы и средств ее достижения, выбора показателей и критериев эффективности для количественного оценивания степени достижения цели, назначения в первом приближении структуры и параметров системы.

Цели, показатели и критерии эффективности систем являются взаимосвязанными понятиями. Если цель определяет назначение, требуемый результат применения системы, то показатель эффективности оценивает количественно степень достижения цели, а критерий эффективности является правилом, с помощью которого по показателю эффективности выбирается предпочтительный вариант системы.

Показатели эффективности сложных систем зависят от ряда факторов и поэтому могут быть представлены в виде функций от факторов, изменяющихся в не-

котором факторном пространстве. Эти факторы характеризуют параметры системы, условия и способы применения ее по назначению.

При исследовании системы возникает необходимость в выявлении функциональных зависимостей показателей эффективности от определяющих факторов. Установить хотя бы приближенный вид зависимости аналитическими методами для сложных систем удается редко. Поэтому для решения данной задачи теоретическими методами приходится строить имитационную модель исследуемой системы в виде машинной программы и проводить имитационные эксперименты с этой программой. Приблизенно функциональные зависимости показателей от влияющих факторов с достаточной для практики точностью могут быть получены путем статистической обработки результатов имитационного моделирования.

Синтез системы проводится последовательным приближением на основе оценивания достигаемых значений показателя эффективности по результатам моделирования системы со структурой и параметрами, постепенно приближающимися сначала к удовлетворительным, а затем к предпочтительным (оптимальным) структуре и параметрам. Если выясняется, что поставленная перед системой цель не достигается, а ослабление цели недопустимо, применяются новые средства достижения цели. При этом существенно меняются структура и параметры системы.

Выбор цели системы в определенной степени обуславливается возможностями ее достижения. В процессе синтеза системы выбор и изменение как средств достижения, так и цели системы производится обычно итеративным путем, причем изменение цели системы в процессе разработки и соответственно средств ее достижения вызывается не только трудностями достижения цели, но также изменениями факторов внешней среды и раскрытием неопределенностей в ней во время разработки системы. Опыт показывает, что цель разрабатываемой системы может изменяться многократно: частично из-за трудностей, встретившихся при попытке удовлетворить первоначальному заданию, и частично вследствие того, что изменились цели вышестоящих систем, средством достижения которых должна была служить разрабатываемая система.

Изменение цели разрабатываемой системы в результате анализа вышестоящих систем, а также изменений во внешней среде или знаний о ней существенно изменяет задачи разработки системы. Особенно сильно на цели создания систем вооружения влияют изменения целей и характеристик систем противника. Изменение цели может произойти и за время существования системы. Например, научно-технические достижения могут открыть перед системой новые возможности в результате ее модернизации или сделать цель недостижимой для данной системы в новых условиях применения.

Иерархической структуре системы соответствует иерархия целей ее компонентов. Благодаря согласованности и взаимной подчиненности своих целей все компоненты работают целенаправленно для достижения общей для них цели системы. Цели подсистемы (подцели) можно рассматривать как средства достижения цели системы в целом. Подцели или средства достижения цели удобно толковать как задачи, выполнение которых необходимо для достижения вышестоящей цели.

Пусть Q_i – цель системы, находящейся на i -м уровне иерархии. Тогда цели систем более низкого уровня Q_{i-1} будут средствами достижения цели Q_i или задачами системы i -го уровня. В свою очередь, Q_i – средство достижения цели Q_{i+1} или задача системы $(i+1)$ -го уровня. Графическое описание иерархической структуры целей представляет собой граф, называемый *деревом целей*.

Цели системы и ее компонентов в конечном итоге определяют облик, структуру и основные характеристики системы.

При выборе показателей эффективности системы рекомендуется учитывать следующие общие требования:

показатель должен обеспечивать оценивание эффективности выполнения возложенных на систему задач;

показатель должен быть чувствителен к анализируемым вариантам системы, в частности, к выбираемым параметрам;

показатель должен быть достаточно простым и наглядным, иметь ясный физический смысл, чтобы у лица, принимающего решение, не возникало затруднений при физической интерпретации результатов исследования.

При выборе критериев эффективности обычно исходят из двух основных требований:

1) критерий должен обеспечивать выбор системы, эффективно выполняющей свои функции в соответствии с ее целевым назначением;

2) критерий должен быть согласован с применяемым методом синтеза системы.

Задача проектирования системы вследствие большой сложности неизбежно разделяется на иерархическую систему более простых частных задач по проектированию компонентов системы. Цель декомпозиции – упростить синтез системы путем оптимизации решения частных задач. Такой подход к синтезу называется *субоптимизацией*. Синтез системы при этом осуществляется объединением решений частных задач и усовершенствования этих решений с учетом взаимных связей между частными задачами, причем рассмотрение частной задачи как самостоятельной может привести к тому, что критерии в частных задачах, кажущиеся правдоподобными, будут несовместимыми с критериями системы в целом. Чтобы этого не случилось, необходимо при субоптимизации руководствоваться системным подходом и в соответствии с ним подчинять показатели эффективности подсистем показателям эффективности вышестоящих систем. Такая иерархия показателей эффективности будет соответствовать иерархии целей и задач.

4.4. Формализация задачи проектирования систем ВВТ

Формализация задачи проектирования играет важную роль в синтезе проектируемой системы, при которой формируется область поиска решения и формализуется система предпочтений и принцип оптимальности.

На первом этапе постановки задачи синтеза системы формулируются требования к системе в терминах характеристик в определенном смысле инвариантных

по отношению к внешней среде. Для этого вводится набор частных показателей качества, которые стремятся определить так, чтобы они зависели только от конструктивных параметров системы.

Если каждому варианту системы сопоставить некоторый набор параметров

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad \mathbf{x} \in \Omega_x,$$

где Ω_x – множество всех возможных альтернатив системы, то набор частных показателей $F_i(\mathbf{x})$, $i = 1, \dots, m$, можно представить в виде векторного показателя $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = (F_1(\mathbf{x}), \dots, F_m(\mathbf{x}))$, причем всегда можно выбрать частные показатели так, чтобы лучшему качеству системы соответствовали их большие значения. Последнее указывает на то, что цели проектирования (улучшения качества системы) соответствует увеличение значений частных показателей качества.

Пусть имеются две альтернативы системы $\mathbf{x}' \in \Omega_x$ и $\mathbf{x}'' \in \Omega_x$. Говорят, что альтернатива $\mathbf{x}'$ доминирует над альтернативой $\mathbf{x}''$ в смысле векторного показателя $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = (F_1(\mathbf{x}), \dots, F_m(\mathbf{x}))$, если $F_i(\mathbf{x}') \geq F_i(\mathbf{x}'')$, причем хотя бы для одного значения i имеет место строгое неравенство. Очевидно, что из двух альтернатив $\mathbf{x}'$ и $\mathbf{x}''$ доминирующая альтернатива $\mathbf{x}'$ будет предпочтительнее в силу указанного выше стремления к увеличению значений всех частных показателей. Поэтому альтернатива $\mathbf{x}''$ может быть исключена из дальнейшего рассмотрения. Процедуру отсева неконкурентных значений $\mathbf{x}'$ можно продолжать до тех пор, пока она не приведет к выделению множества $\Omega_x^* = P(\Omega_x, \mathbf{F})$ альтернатив $\mathbf{x}$ на сравнимых в смысле указанного принципа доминирования. Множество $\Omega_x^* = P(\Omega_x, \mathbf{F})$ называется множеством оптимальных альтернатив, а соответствующее им множество $\{\mathbf{F}_p\} = \mathbf{F}(\Omega_x^*)$ векторов – эффективными векторами.

Принцип доминирования по векторному показателю $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ является частным случаем задания на множестве Ω_x отношения предпочтения. В теории выбора и принятия решений используется формализм бинарных отношений. Применительно к данному случаю должно рассматриваться бинарное отношение r на множестве альтернатив Ω_x , представляющее собой множество R упорядоченных пар $(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_k)$, где $\mathbf{x}_l \in \Omega_x$ и $\mathbf{x}_k \in \Omega_x$, т.е. $r = \langle \Omega_x, R \rangle$ и множество R принадлежит декартову произведению множества Ω_x самого на себя $(\tilde{R} \subset \Omega_x \times \Omega_x = \Omega_x^2)$.

Бинарное отношение r к Ω_x называется полным, если любые два элемента из множества Ω_x связаны отношением r . Дополнение $\bar{r}$ бинарного отношения r определяется как: $\mathbf{x}_l \bar{r} \mathbf{x}_k$ или $(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_k) \notin R$, т.е. неверно, что $\mathbf{x}_l$ находится в отношении r с $\mathbf{x}_k$.

Бинарное отношение r на множестве Ω_x называется:

рефлексивным, если xrx для всех $x \in \Omega_x$;

симметричным, если из x_lrx_k следует x_krx_l для всех $x_l, x_k \in \Omega_x$;

асимметричным, если из x_lrx_k следует x_krx_l для всех $x_l, x_k \in \Omega_x$;

антисимметричным, если для всех $x_l, x_k \in \Omega_x$ из x_lrx_k и x_krx_l вытекает, что $x_l = x_k$;

транзитивным, если для всех $x_l, x_k, x_s \in \Omega_x$ из x_lrx_k и x_krx_s следует x_lrx_s ;

эквивалентным, если r транзитивно, рефлексивно и симметрично;

порядком, если r транзитивно и антисимметрично;

квазипорядком, если r рефлексивно и транзитивно.

В том случае, когда одновременно $x_l\bar{r}x_k$ и $x_k\bar{r}x_l$ альтернативы x_l и x_k называются несравнимыми.

Понятие бинарного отношения позволяет формализовать различные по своей природе операции попарного сравнения альтернатив. Пару (Ω_x, r) , состоящую из множества Ω_x и бинарного отношения r в нем, принято называть моделью выбора.

Элемент $x_0 \in \Omega_x$ называется наилучшим по r в Ω_x , если он не менее предпочтителен, чем любой из Ω_x , т.е. если x_0rx справедливо для любого $x \in \Omega_x$. Может оказаться, что в множестве Ω_x есть элементы, не сравнимые по отношению r , поэтому вводится понятие максимального элемента.

Элемент $x_m \in \Omega_x$ называется *максимальным элементом* в модели (Ω_x, r) , если xrx_m влечет x_mrx для всякого x из Ω_x . Множество всех максимальных в модели (Ω_x, r) элементов обозначают как $\max(\Omega_x, r)$.

Формирование области поиска решения и формализация системы предпочтений и принципа оптимальности является сложной задачей. Используя формальные конструкции, удастся добиться лишь приближения к тем принципам оптимальности, которыми оперирует заказчик при оценивании системы. Как правило, представления заказчика об оптимальности шире по своему содержанию чем те, которые ему удалось указать в тактико-техническом задании и формализовать. Поэтому после постановки задачи проектирования в процессе ее решения и анализа приходится задачу корректировать по меньшей мере за счет уточнения принципа оптимальности.

Пусть удалось определить и формализовать область поиска решения, т.е. исходное множество альтернатив Ω_x , среди которых необходимо отыскать хотя бы одну альтернативу, удовлетворяющую определенному представлению об оптимальности. Для выделения альтернативы эти представления нужно уметь формализовать, т.е. формализовать ту систему предпочтений, носителем которой является заказчик. Обычно та система предпочтений, которой руководствуется заказчик, окончательно выявляется в процессе анализа и отбраковки конкретно предъявлен-

ных альтернатив. Следовательно, чтобы синтезировать определенную концепцию оптимальности, необходим анализ возможностей.

При определении системы предпочтений возникает еще одна принципиальная трудность. Определять систему предпочтений приходится на множестве альтернатив проектируемой технической системы, однако эффективность функционирования будущей системы зависит не только от совершенства ее конструктивного облика, но и от способов ее использования и условий применения. Следовательно, при определении системы предпочтений необходимо ответить на вопрос о том, какие следует выбрать режимы функционирования системы, на которых бы можно было подвергать сравнению конструктивное совершенство проектируемой системы. Трудности усугубляются тем, что системы функционируют, как правило, в условиях неопределенности и даже противодействия других или аналогичных систем противника.

Обычно при внешнем проектировании тем или иным способом генерируется рабочее множество альтернатив для формирования системы предпочтений и принципа оптимальности. Эти альтернативы сравниваются между собой и с аналогичными зарубежными образцами в некоторых предполагаемых условиях функционирования с проведением имитационных экспериментов, на основе экспертиз и т.д. При этом имитируются весьма сложные условия и режимы функционирования будущей системы, поэтому сравнению может быть подвергнуто лишь небольшое число альтернатив. Этого оказывается недостаточно для построения адекватной аппроксимации предпочтений как некоторой модели выбора $\max(\Omega_x, r)$ для передачи ее на стадию внутреннего проектирования. Следовательно, система предпочтений заказчика может быть реализована на относительно небольшом конечном множестве альтернатив $\Omega_x^* \subset \Omega_x$, поэтому модель (Ω_x^*, r) не может служить моделью выбора на стадии внутреннего проектирования, так как для этого необходимо иметь систему предпочтений на всем исходном множестве альтернатив Ω_x .

В силу указанных обстоятельств традиционной формой тактико-технического задания является перечень требований к тактико-техническим характеристикам будущей системы. В этих требованиях в какой-то степени оказывается отраженной та система предпочтений, которая выработалась на стадии внешнего проектирования. В действительности часто оказывается, что требования сформулированы очень жестко, недостаточно обосновано и их в дальнейшем не удастся реализовать. Поэтому традиционная форма, в которую облечены требования тактико-технического задания, оказывается некорректной. Выходом из такого положения может быть лишь организация научно обоснованного информационного взаимодействия между стадиями внешнего и внутреннего проектирования и корректировка первоначального варианта тактико-технического задания. Рациональной схемой этого взаимодействия может быть схема, в которой генерация рабочего множества альтернатив Ω_x будущей системы (на котором представители внешнего проектирования формируют модель выбора (Ω_x, r) , т.е. свою систему предпочтений) осуществляется представителями внутреннего проектирования. Последние больше, чем кто-либо другой, знают возможности современной технологии и обладают опытом реального проектирования.

Задание на формирование рабочего множества альтернатив должно исходить от представителей внешнего проектирования, поскольку именно они лучше всего представляют себе цели, ради достижения которых создается система.

Процедура формирования тактико-технического задания в соответствии с указанной схемой должна состоять из этапов обмена информацией между представителями внешнего и внутреннего проектирования и постановки конкретных задач, которые необходимо решать на этих этапах.

Чтобы рабочее множество альтернатив Ω_x^* для представителей внешнего проектирования формировать на стадии внутреннего проектирования, должна быть определена система предпочтений – модель выбора (Ω_x, f) , которую необходимо сообщить представителям внутреннего проектирования. Эта модель выбора должна соответствовать информационному уровню внутреннего проектирования, т.е. реализация отношения f должна быть проверена на этом уровне. Если такое отношение удалось определить, то задача проектирования на первом этапе может быть сформулирована следующим образом:

выделить множество $\Omega_x^* \subseteq \Omega_x$ максимальных элементов в модели (Ω_x, f) :

$$\Omega_x^* = \max(\Omega_x, f).$$

При удачном выборе модели (Ω_x, f) можно ожидать, что анализ проектов из множества Ω_x^* позволит сделать выбор, удовлетворяющий конечным целям внешнего проектирования. Поэтому важным является вопрос о том, когда модель (Ω_x, f) считается выбранной удачно.

Модель (Ω_x, f) можно принять выбранной удачно, если отношение f в определенном смысле универсально – инвариантно к совокупности требований, которые могут быть сформулированы на стадии внешнего проектирования. Это означает, что среди множества альтернатив $\Omega_x^* = \max(\Omega_x, f)$ всегда найдется проект $x \in \Omega_x^*$, удовлетворяющий требованиям заказчика. В этом случае говорят, что отношение f согласовано с целями внешнего проектирования.

Возникает вопрос о выборе отношения f . Отношение предпочтения f должно быть «слабее», чем отношение предпочтения заказчика системы. Вместе с тем оно не должно быть настолько «слабым», чтобы не иметь возможности сформировать ни одной альтернативы из исходного множества Ω_x . Если отношение предпочтения f окажется таковым, что $\max(\Omega_x, f) = \Omega_x$, то пользы от такой модели выбора не будет.

Из опыта проектирования следует, что требования, выраженные в тактико-техническом задании в основном сводятся к перечню характеристик проектируемой системы и набору стандартных ситуаций ее применения. Они формируются в результате длительного опыта проектирования и эксплуатации систем аналогично-

го назначения и выражают основные свойства, определяющие совершенство этих систем. Формально все эти требования представляются в виде задания некоторой совокупности равенств и неравенств, которым подчинены характеристики проектируемой системы, выражающиеся в виде функций, зависящих от конструктивных параметров системы $x \in \Omega_x$. Эти характеристики можно использовать для формирования отношения предпочтения f в модели выбора (Ω_x, f) . Для этого из всего набора характеристик следует выделить такие частные показатели качества системы $F_i(x)$, $i = 1...m$, которые отличаются от остальных характеристик тем свойством, что по смыслу целевого назначения системы их выгодно увеличивать. Остальные характеристики $W_i(x) = (W_1(x), ..., W_l(x))$ используются при формировании ограничений, входящих в состав условий, выделяющих множество Ω_x .

Посредством векторного показателя качества $F(x) = (F_1(x), ..., F_m(x))$ можно задать три типа бинарных отношений:

- 1) $x'f_1x''$ тогда и только тогда, когда $F_i(x') \geq F_i(x'')$, $i = 1, ..., m$;
- 2) $x'f_2x''$ тогда и только тогда, когда $F_i(x') > F_i(x'')$, $i = 1, ..., m$;
- 3) $x'f_3x''$ тогда и только тогда, когда $F_i(x') \geq F_i(x'')$, $i = 1, ..., m$, причем хотя бы для одного i имеет место строгое неравенство.

Отношение f_2 есть отношение строго детерминированное (отношение Слейтера), а отношение f_3 – отношение Парето.

Пусть $S(\Omega_x, F)$ и $P(\Omega_x, F)$ – множество максимальных элементов в Ω_x , соответствующих этим отношениям, т.е. $\max(\Omega_x, f_2)$ и $\max(\Omega_x, f_3)$.

Множество $P(\Omega_x, F)$ называют *множеством эффективных* (оптимальных по Парето), а $S(\Omega_x, F)$ – *множеством полуэффективных* (слабоэффективных по Слейтеру) *альтернатив*.

Отношение f_1 можно представить в виде объединения отношения эквивалентности f_0 ($x'f_0x''$ тогда и только тогда, когда $F_i(x') = F_i(x'')$, $i = 1, ..., m$) и отношения Парето f_3 . Отношение Парето является «асимметричной частью» отношения f_1 . Асимметрия является условием отношения предпочтения. Ее можно рассматривать как критерий этого отношения.

Если элемент x' предпочитают элементу x'' , то нельзя одновременно предпочитать элемент x'' элементу x' . Поэтому в проектировании используют отношение Парето или отношение Слейтера. Отношение Слейтера «слабее» отношения Парето, т.е. отбрасывает меньше альтернатив, чем отношение Парето. Использование отношения Слейтера является более «осторожной» моделью выбора, чем модель выбора по отношению Парето, так как резервирует для дальнейшего анализа в общем случае более широкое множество альтернатив.

При $m = 1$ бинарное отношение определяется скалярным показателем качества $F(x)$ и множества $P(\Omega_x, F)$ и $S(\Omega_x, F)$ совпадают с множеством элементов $x \in \Omega_x$, на которых реализуется $\max_{x \in \Omega_x} F(x)$.

Отношение Парето и отношение Слейтера являются транзитивными отношениями. Транзитивность есть разумный критерий эффективности процедуры отбраковки альтернатив. Действительно, если реализована ситуация, в которой x' лучше x'' , x'' лучше x''' , но x''' лучше x' , то x''' нельзя отбраковывать в этой тройке, так как x'' лучше x' , x' нельзя отбраковывать, так как x' лучше x'' , а x'' нельзя отбраковывать, так как x'' лучше x''' . С другой стороны можно рассуждать и так: x''' нужно отбраковать (x'' хуже x'''), x'' нужно отбраковать (x'' хуже x'), а x' отбраковать, так как x' хуже x'' . Поэтому из соображений здравого смысла ясно, что x' следует предпочесть x'' , если x' предпочтительнее x'' , а x'' предпочтительнее x''' .

Следовательно, на первом этапе решения задачи проектирования разумно отказаться от «жесткой» формы требований тактико-технического задания и преобразовать ее в более «слабую» в виде модели выбора (Ω_x, f_3) или даже (Ω_x, f_2) . Задачей внутреннего проектирования (на этапе формирования облика) будет являться построение множеств альтернатив $P(\Omega_x, F)$ или $S(\Omega_x, F)$ и передача их для дальнейшего анализа на стадию внешнего проектирования, на которой эти множества должны быть использованы для уточнения системы предпочтений и принципа оптимальности, т.е. формирования модели (P, r) или (S, r) , и решения задачи выделения из них максимальных элементов $\Omega_{xf_3r} = \max(P, r)$ или $\Omega_{xf_2r} = \max(S, r)$.

Альтернативы Ω_{xf_3r} или Ω_{xf_2r} должны лечь в основу уточненного тактико-технического задания, форма которого уже может быть традиционной, поскольку она будет лишена указанных недостатков. Фактически на стадию внутреннего проектирования будет передано описание одной или нескольких альтернатив из множеств P и S , а так как их построение было выполнено представителями внутреннего проектирования, то следует ожидать, что прежних противоречий между требованиями тактико-технического задания и возможностями внутреннего проектирования не возникнет.

Информационное взаимодействие между стадиями внешнего и внутреннего проектирования через этап формирования облика системы может быть организовано следующим образом.

1. От представителей внешнего проектирования поступает набор характеристик $W = (W_1, W_2, \dots, W_l)$, подчиненных необходимым ограничениям, и вектор частных показателей качества $F = (F_1, F_2, \dots, F_m)$, на основании которого сформулирована система предпочтений f .

2. Представители внутреннего проектирования формируют с учетом указанных требований в виде ограничений на характеристики W_j , $j = 1, 2, \dots, l$, исходное множество альтернатив будущей системы Ω_x . В результате у представителей внутреннего проектирования появляется модель выбора (Ω_x, f) .

3. Представители внутреннего проектирования решают задачу первого этапа синтеза облика будущей системы – определяют множество Ω_{xf} максимальных элементов в модели (Ω_x, f) и сообщают его представителям внешнего проектирования.

4. На стадии внешнего проектирования решают задачу второго этапа синтеза облика системы – определяют на основе анализа элементов из множества Ω_{xf} окончательную систему предпочтений r и строят множество максимальных элементов Ω_{xfr} в модели (Ω_{xf}, r) .

5. Если среди элементов множества Ω_{xfr} найдутся варианты системы, соответствующие представлениям заказчика об оптимальности, то их описание ложится в основу окончательного варианта тактико-технического задания, которое поступает на стадию внутреннего проектирования для формирования технического предложения на детальную разработку проекта.

Если среди вариантов Ω_{xfr} не нашлось удовлетворительных (или представителям внешнего проектирования не удалось на основе анализа множества Ω_{xf} окончательно уточнить систему предпочтений r), то исходные требования и система предпочтений f должны быть пересмотрены. Это означает, что должны быть пересмотрены требования к характеристикам $W_1, W_2, \dots, W_l$ и вектору частных показателей качества $F_1, F_2, \dots, F_m$. После формирования новых требований и нового вектора частных показателей качества описанная процедура повторяется. Если разумное число таких итераций не дает удовлетворительных результатов, то необходимо либо снижать требования, либо искать принципиально новую систему, кардинально меняя структуру множества Ω_x .

Итеративная процедура обмена информацией между представителями внешнего и внутреннего проектирования представляет собой содержательную сторону диалога «заказчик–разработчик». Информация, которой они обмениваются, рождается в результате решения конкретно поставленных математических задач.

4.5. Декомпозиция задачи проектирования систем ВВТ

Для реализации рассмотренной двухэтапной процедуры постановки и решения задачи проектирования необходимо соответствующее ей математическое обеспечение. Его разработка наталкивается на ряд трудностей:

структура множества Ω_x для сложных систем чрезвычайно сложна, а размерность вектора проектных параметров $x \in \Omega_x$ очень велика;

отношение предпочтения f трудно проверяемо, т.е. компоненты вектора частных показателей качества $F(x)$ являются сложными трудновычислимыми функциями;

модель функционирования системы, без которой невозможно вычисление компонентов вектора $F(x)$, т.е. проверка реализации отношения f , сложна и представляет собой совокупность разнородных взаимосвязанных моделей;

сложна задача построения универсального отношения f , поскольку качество функционирования системы зависит не только от ее конструктивного облика, но и от качества управления ею и внешних условий функционирования.

Преодолеть первые три трудности можно путем декомпозиции задачи проектирования, приводящей к построению иерархической структуры задач внутреннего проектирования.

Для того чтобы бороться со сложностью описания проектируемой системы, т.е. со сложностью структуры множества Ω_x и большой размерностью вектора x , естественным является введение иерархии уровней детализации описания конструкции системы.

Пусть набор проектных параметров $x \in \Omega_x \subset E_n$, где E_n – векторное пространство размерности n . Выбор конкретного значения $x \in \Omega_x$ с определенной степенью детализации определяет конструкцию системы. Вектор проектных параметров x может давать далеко не самое подробное описание системы. Основное требование состоит в том, чтобы задание $x \in \Omega_x$ не вызывало сомнений в реализации проекта системы с параметрами x .

Обозначим процедуру выделения максимальных элементов в модели (Ω_x, f) , выполняемую на первом этапе решения задачи проектирования, следующим образом:

$$\Omega_x \rightarrow \Omega_{xf} = \max(\Omega_x, f).$$

Введем несколько уровней описания так, чтобы описания системы на соседних уровнях были связаны между собой соотношениями:

$$x^{j+1} = \phi_{j+1}(x^j), \quad \Omega_x^{j+1} = \phi(\Omega_x^j);$$

$$x^j \in \Omega_x^j \subset E_{n_j}, \quad x^{j+1} \in \Omega_x^{j+1} \subset E_{n_{j+1}},$$

где $j = 0, 1, 2, \dots, k-1, k$ – число уровней, $n_{j+1} \leq n_j$, $\phi_{j+1}(\Omega_x^j)$ – отображение, которое переводит множество Ω_x^j в множество Ω_x^{j+1} .

Каждый вектор x^{j+1} получается из вектора x^j агрегированием при помощи вектор функции ϕ_{j+1} и дает при $n_{j+1} < n_j$ более целостное описание системы, чем x^j .

На каждом $j+1$ уровне задается отношение f_{j+1} , причем определение множества максимальных элементов $\Omega_{xf_{j+1}}$ в модели $(\Omega_x^{j+1}, f_{j+1})$ представляет собой менее трудоемкую задачу, чем аналогичного множества Ω_{xf_j} в модели (Ω_x^j, f_j) .

Агрегирование является действенным приемом, используемым на практике. Формы агрегирования весьма разнообразны и существенно зависят от содержательного смысла решаемой задачи. Отношения f_{j+1} и f_j могут иметь одинаковый содержательный смысл, но будут различаться полнотой учета конструкторской документации. Отношение f_{j+1} строится на более общей информации о системе, чем f_j , и поэтому менее чувствительно к деталям описания. В отношении f_j обычно учитываются дополнительные (по сравнению с f_{j+1}) требования к системе, естественно возникающие при детализации описания. Каждому уровню описания соответствует определенная форма модели функционирования.

Наряду с функциями ϕ_{j+1} должны рассматриваться и обратные функции ϕ_{j+1}^{-1} , восстанавливающие по заданному x^{j+1} его прообразы x^j . Эти функции чаще всего задаются не аналитически, а алгоритмически и процедура их вычисления оказывается достаточно трудоемкой.

Рассмотрим рекуррентное соотношение

$$\Omega_{xf_j}^* = \max\left(\phi_{j+1}^{-1}\left(\Omega_{xf_{j+1}}^*\right), f_j\right), \quad j = k-1, k-2, \dots, 1, 0$$

с начальным условием $\Omega_{xf_k}^* = \Omega_{xf_k} = \max\left(\Omega_x^k, f_k\right)$ (здесь $\phi_{j+1}^{-1}\left(\Omega_{xf_{j+1}}^*\right)$ – полный образ множества $\Omega_{xf_{j+1}}^*$ при отображении $\phi_{j+1}^j: \Omega_x^j \rightarrow \Omega_x^{j+1}$).

В качестве решения задачи проектирования примем множество $\Omega_{xf_0}^*$. Процесс нахождения $\Omega_{xf_0}^*$ из $\Omega_{xf_j}^* = \max\left(\phi_{j+1}^{-1}\left(\Omega_{xf_{j+1}}^*\right), f_j\right)$ представим в виде диаграммы

$$\Omega_{xf_{j+1}}^* \rightarrow \Omega_{xf_j}^* = \max\left(\phi_{j+1}^{-1}\left(\Omega_{xf_{j+1}}^*\right), f_j\right).$$

Последовательная процедура нахождения элементов множеств $\Omega_{xf_j}^*$ представляет собой детализацию вариантов проекта при переходе от одного уровня описания к другому, т.е. процедуру синтеза альтернатив будущей системы. При «хороших» свойствах ϕ_j , f_j построение множества $\Omega_{xf_0}^*$ в отличие от прямого отыскания множества $\Omega_{xf_0} = \max\left(\Omega_x^0, f_0\right)$ может быть реализовано математическими методами. Но здесь возникает проблема: насколько множество $\Omega_{xf_0}^*$, кото-

рое принимается за решение задачи проектирования, приемлемо в качестве представления множества Ω_{xf_0} ?

Проблема может считаться решенной удовлетворительно, если удастся гарантировать выполнение какого-либо из условий:

$$\Omega_{xf_0} = \Omega_{xf_0}^*,$$

$$\Omega_{xf_0} \subseteq \Omega_{xf_0}^*$$

или

$$\left(\Omega_{xf_0} = \Omega_{xf_0}^*\right) / I_{f_0},$$

$$\left(\Omega_{xf_0} \subseteq \Omega_{xf_0}^*\right) / I_{f_0}$$

в случае транзитивности отношения f_0 . Здесь запись вида $(Z \subseteq Y) / I_f$ означает включение с точностью до отношения эквивалентности I_f , порожденного отношением f , а $(Z = Y) / I_f$ – совпадение множеств Z с точностью до отношения эквивалентности I_f . Требование включения Ω_{xf_0} в $\Omega_{xf_0}^*$ или их совпадения с точностью до отношения эквивалентности, порожденного отношением f_0 , естественно так, как при этом не теряется ни одного «оптимального» варианта проектируемой системы.

В общем случае множество $\Omega_{xf_0}^*$, найденное из $\Omega_{xf_{j+1}}^* \rightarrow \Omega_{xf_j}^* = \max\left(\phi_{j+1}^{-1}\left(\Omega_{xf_{j+1}}^*\right), f_j\right)$, может не содержать ни одного «оптимального» варианта из множества Ω_{xf_0} . Поэтому для корректировки перехода от задачи $\Omega_x^0 \rightarrow \Omega_{xf_0} = \max\left(\Omega_x^0, f_0\right)$ к задаче $\Omega_{xf_{j+1}}^* \rightarrow \Omega_{xf_j}^* = \max\left(\phi_{j+1}^{-1}\left(\Omega_{xf_{j+1}}^*\right), f_j\right)$, т.е. для выполнения одного из условий $\Omega_{xf_0} = \Omega_{xf_0}^*$, $\Omega_{xf_0} \subseteq \Omega_{xf_0}^*$, $\left(\Omega_{xf_0} = \Omega_{xf_0}^*\right) / I_{f_0}$, $\left(\Omega_{xf_0} \subseteq \Omega_{xf_0}^*\right) / I_{f_0}$, отношения f_j и агрегирование должны быть определенным образом согласованы. На содержательном уровне согласованность f_j с f_{j+1} означает следующее.

Пусть на $(j+1)$ -м уровне иерархии процесса проектирования альтернатива x' предпочтительнее x'' по отношению f_{j+1} . Тогда при переходе на более детальный уровень описания системы может быть сохранена частичная упорядоченность альтернатив по отношению f_j . Это означает, что на соседних уровнях иерархии одинаково понимается, что такое «лучшая система». Тогда k -й уровень агрегирования, дающий наиболее полное описание системы, и есть тот уровень, который должен быть принят на этапе формирования облика системы.

Процедура нахождения множеств $\Omega_{xf_j}^*$ состоит из последовательных шагов, на каждом из которых решаются два типа задач:

1) построение обратного отображения ϕ_{j+1}^{-1} , определяющего полный образ множества $\Omega_{xf_{j+1}}^*$, выделенного на предыдущем шаге;

2) решение задачи построения множества максимальных элементов в модели $\left(\phi_{j+1}^{-1}\left(\Omega_{xf_{j+1}}^*\right), f_j\right)$.

Первая задача относится к классу обратных задач, а вторая задача – к классу задач векторной оптимизации.

Таким образом, процесс синтеза альтернатив будущей системы представляет собой последовательную цепочку решения обратных задач и задач оптимизации. Сложность проблемы синтеза во многом является следствием трудности решения этих задач. Схема процедуры синтеза проекта системы может быть представлена следующим образом.

Со стадии внешнего проектирования на стадию внутреннего проектирования поступает отношение предпочтения f_k и некоторая совокупность требований к характеристикам системы. На стадии внутреннего проектирования (этап формирования облика сложной системы) формируется исходное множество альтернатив Ω_x^k и модель выбора $\left(\Omega_x^k, f_k\right)$. На основе этой модели на этапе формирования облика строится «рабочее» множество альтернатив $\Omega_{f_k}^* = \max\left(\Omega_x^k, f_k\right)$ для представителей внешнего проектирования, которые в результате анализа этого множества формируют корректное тактико-техническое задание и выдают его представителям внутреннего проектирования, которые выделяют из множества $\Omega_{f_k}^*$ одну или несколько альтернатив, которые берутся за основу для разработки технического предложения на проектирование системы. Далее начинается процедура детализации проекта.

Пусть была выделена одна альтернатива x_0^k . Строятся все прообразы $\phi_k^{-1}\left(x_0^k\right)$ проекта x_0^k и поступают в качестве альтернатив технического предложения на уровень $(k-1)$, где из них выделяются максимальные элементы по отношению f_{k-1} . Все они удовлетворяют требованиям, предъявленным к проекту x_0^k . Из максимальных элементов выделяется проект x_0^{k-1} и строятся все его прообразы с помощью отображения ϕ_{k-1}^{-1} . Они передаются на уровень $(k-2)$ и т.д., пока эта процедура не приведет к выделению проекта x_0^0 на самом детальном «нулевом» уровне. Образуется цепочка описаний системы (цепочка проектов) $x_0^k \rightarrow x_0^{k-1} \rightarrow \dots \rightarrow x_0^1 \rightarrow x_0^0$, дающая полное описание будущей системы на всех уровнях детализации.

Рассмотренная схема процедуры синтеза проекта системы явно идеализирована. В действительности всегда будут возникать отклонения, обусловленные неполнотой математического обеспечения, несогласованностью предпочтений, неточностью моделей функционирования и т.п. Поэтому каждое описание системы в цепочке $x_0^k \rightarrow x_0^{k-1} \rightarrow \dots \rightarrow x_0^1 \rightarrow x_0^0$ должно подвергаться анализу на максимально возможных точных и полных моделях с привлечением высокоточных алгоритмов расчета характеристик и результатов экспериментальных исследований на натуральных и полунатурных моделях. Таким образом, математическое обеспечение процесса решения задачи проектирования по своему назначению подразделяется на две большие системы: систему анализа и систему синтеза.

Систему анализа составляют точные и полные модели и алгоритмы проверочного расчета, систему синтеза – упрощенные модели и быстрые алгоритмы решения обратных и оптимизационных задач. Взаимодействие систем синтеза и анализа имеет интерактивный характер. Каждый выполненный синтез проверяется и уточняется на системе анализа. Эта процедура повторяется до тех пор, пока не будет получен проект, удовлетворяющий разработчика и заказчика.

4.6. Теория принятия решений при проектировании систем ВВТ

При системном подходе к исследованию военно-технических проблем важную роль играет теория принятия решений, описывающая закономерности процесса принятия решений и определяющая методы и технологию их подготовки и выбора.

Теория принятия решений рассматривает математические модели процессов принятия решений. Эта задача направлена на определение наилучшего (оптимального) способа действий для достижения поставленных целей. Под целью понимается идеальное представление желаемого состояния или результата деятельности. Если фактическое состояние не соответствует желаемому, то имеет место проблема. Выработка плана действий по устранению проблемы составляет сущность задачи принятия решений.

Проблема всегда связана с определенными условиями, которые обобщенно называют ситуацией. Совокупность проблемы и ситуации образует проблемную ситуацию. Выявление и описание проблемной ситуации дает исходную информацию для постановки задачи принятия решений. Ситуацию, в которой происходит принятие решения, характеризуют следующие основные черты:

- наличие цели, т.е. необходимость принятия решения диктуется наличием некоторой цели, которую требуется достичь; если цель не поставлена, то нет необходимости принимать какое-либо решение;

- наличие альтернативных (взаимоисключающих) линий поведения, т.е. решение принимается в условиях, когда существует более одного способа достижения цели; если же существует лишь одна линия поведения, то выбора нет и, следовательно, решение принимать не требуется;

- наличие ограничивающих факторов, т.е. решения принимаются в условиях действия большого числа факторов, ограничивающих возможность выбора способов действий; отсутствие ограничений упрощает задачу принятия решения.

Таким образом, задача принятия решения возникает в том случае, когда существует цель, которую нужно достичь, когда возможны различные способы ее достижения и имеются факторы, ограничивающие возможности достижения цели. Основную роль в задаче принятия решения играет лицо, принимающее решение (ЛПР) – человек, имеющий цель, служащую мотивом постановки задачи и поиска ее решения. Решение принимается на основе собственных предпочтений. Для помощи ЛПР в сборе и анализе информации и формировании решений привлекаются эксперты-специалисты по решаемой проблеме, имеющие информацию о рассматриваемой задаче, отвечающие за свои рекомендации. Эксперты уменьшают степень неопределенности информации.

Задачу принятия решения образует пара $\langle \Omega, \text{ОП} \rangle$, где Ω – множество вариантов решений, из которого нужно выделить некоторое подмножество (или один вариант); ОП – принцип оптимальности, дающий представление о качестве вариантов.

Решением задачи $\langle \Omega, \text{ОП} \rangle$ является множество $\Omega_{\text{ОП}} \subseteq \Omega$, полученное с помощью принципа оптимальности – правила, в соответствии с которым устанавливается предпочтительность в множестве решений. Отсутствие хотя бы одного из этих элементов лишает смысла задачу принятия решения. Если нет множества Ω , то выделить решение $\Omega_{\text{ОП}}$ не из чего. Если нет принципа оптимальности, то найти решение невозможно, поскольку неизвестно, чем руководствоваться при выборе решения.

Задача принятия решения может быть записана как

$$\langle \Omega, \text{ОП} \rangle \rightarrow \Omega_{\text{ОП}},$$

где $\Omega_{\text{ОП}}$ – множество выбранных из Ω в соответствии с принципом оптимальности ОП альтернатив.

Принятие решений осуществляется в условиях ограничений, которые должны учитываться при принятии решения в конкретной проблемной ситуации.

Решение называется *допустимым*, если оно удовлетворяет ограничениям, и *оптимальным*, если оно обеспечивает экстремум (максимум или минимум) показателя качества решения или удовлетворяет некоторому принципу оптимальности более общего вида.

Задачи принятия решений различают в зависимости от имеющейся информации о множестве Ω и принципе оптимальности ОП. В общей задаче принятия решений как Ω , так и ОП могут быть неизвестными. Здесь множество Ω не имеет заранее определенных границ, а принцип выбора ОП не формализован или не фиксирован. Задачу с известным Ω называют задачей выбора, а задачу с известными Ω и ОП – общей задачей оптимизации. В задаче выбора множество Ω однозначно определено, но принцип выбора ОП не может быть формализован. В этом случае выбор зависит от того, кто и на основе какой информации его делает. В задаче оптимального выбора множество Ω однозначно определено, а принцип выбора формализован, т.е. может быть описан, и результаты его применения к элементам из Ω не зависят от субъективных факторов. Таким образом, задача выбора и задача оптимизации являются частными случаями общей задачи принятия решений.

Общая задача принятия решений и задача выбора относятся к не полностью определенным задачам. Практические пути поиска решения этих задач состоят в использовании для этой цели ряда задач с фиксированным, но меняющимся от задачи к задаче множеством Ω и фиксированным принципом выбора ОП. Это производится с применением ряда приемов.

Первый прием состоит в организации итеративного процесса поиска решений для последовательности задач оптимального выбора. Этот процесс начинается с нахождения решений одной или нескольких формализованных задач с последующим переходом к экспертному анализу полученных решений, назначением измененных множеств альтернатив Ω и принципов выбора ОП, новым поиском решений набора задач и т.д. до получения удовлетворительного решения.

Второй прием заключается в поиске решения ослабленного варианта задачи оптимального выбора, когда принцип выбора формализован не полностью, а допускает участие экспертов, каждый из которых обычно не формальным образом фиксирует принцип ОП. В этом случае эксперт формулирует свою задачу оптимального выбора, а решение исходной задачи формируется на основе решений таких задач.

Третий прием состоит в том, что общей задаче принятия решения как задаче выбора сопоставляется некоторый ее аналог, взятый среди задач оптимального выбора, а полученное решение служит основой для неформального поиска решения требуемой задачи.

Процесс получения решения задачи $\langle \Omega, \text{ОП} \rangle$ организуют по следующей общей схеме: формируют множество Ω , т.е. подготавливают альтернативы, затем осуществляют выбор из этого множества – получают решение задачи выбора. В процессе формирования множества Ω используют условия возможности и допустимости альтернатив, которые определяются конкретными ограничениями задачи. При этом считают, что существует множество всех мыслимых альтернатив Ω_0 , включающее все варианты, которые могут встретиться в рассматриваемой задаче выбора при различных условиях.

Задача формирования Ω является задачей выбора $\langle \Omega_0, \text{ОП}_0 \rangle$, где ОП_0 – принцип оптимальности, выражающий условия допустимости альтернатив. Множество Ω , полученное в результате решения задачи выбора, называется исходным для дальнейшего выбора множеством альтернатив. Получение решения общей задачи принятия решений сводится к поиску решений двух последовательных задач выбора:

- 1) задачи выделения исходного множества альтернатив;
- 2) задачи выбора из этого множества.

Множество допустимых альтернатив $\Omega \subseteq \Omega_0$ образуется как пересечение множеств осуществимых и приемлемых альтернатив. Выбор определенной альтернативы из множества допустимых альтернатив происходит в соответствии с некоторой системой предпочтений, заданной на этом множестве. Выбор, таким образом, – это задание некоторого множества вариантов $\Omega \subseteq \Omega_0$ и выделение из него некоторого его подмножества $\Omega_{\text{ОП}} \subseteq \Omega$. Множество Ω называют множеством предъявленных вариантов, а $\Omega_{\text{ОП}}$ – множеством выбранных вариантов. В такой модели выбор описывается

парой множеств $(\Omega, \Omega_{\text{ОП}})$, где Ω и $\Omega_{\text{ОП}}$ удовлетворяют условию $\Omega_{\text{ОП}} \subseteq \Omega \subseteq \Omega_0$. В теории выбора вариантов принимается дополнительное условие: выбранное множество $\Omega_{\text{ОП}}$ не должно быть пустым. Рассматривают и более жесткое требование: должен быть выбран ровно один вариант, т.е. множество $\Omega_{\text{ОП}}$ должно быть одноэлементным: $\Omega_{\text{ОП}} = \{\bar{x}\}$, где $\bar{x} \in \Omega$. В последнем случае выбор называют единственным, в общем случае выбор называют множественным. Допустим, задано семейство ω подмножеств универсального множества вариантов Ω_0 . Элементы Ω этого семейства рассматриваются как множества, допускаемые к предъявлению.

Пусть для каждого предъявления $\Omega \in \omega$ указано соответствующее множество выбранных вариантов $\Omega_{\text{ОП}} \subseteq \Omega$. Семейство пар $\{(\Omega, \Omega_{\text{ОП}})\}$, $\Omega \in \omega$, называют внешним описанием выбора. Если указан прямой или косвенный способ построения выбора $\Omega_{\text{ОП}}$ для каждого конкретного предъявления $\Omega \in \omega$, то считают, что задан механизм выбора, а его описание называют внутренним описанием выбора.

Модель выбора можно представить в виде преобразователя, на вход которого подаются предъявляемые множества Ω , а на выходе наблюдаются множества $\Omega_{\text{ОП}}$. Внешнее описание выбора – это описание такого преобразователя на уровне «вход–выход», а описание механизма выбора – это раскрытие внутренней структуры преобразователя.

Совокупность пар $\{(\Omega, \Omega_{\text{ОП}})\}$ удобно рассматривать как график отображения $\Omega_{\text{ОП}} = C(\Omega)$, заданного на семействе множеств ω . Такое отображение называют *функцией выбора*. Функция выбора $C(\cdot)$ удовлетворяет требованию $C(\Omega) \subseteq \Omega$ для всех $\Omega \in \omega$. Кроме того, $C(\Omega) \neq \emptyset$ для всех $\Omega \neq \emptyset$, если принимается постулат непустоты выбора. Преобразователь, или механизм выбора, служит своего рода генератором соответствующей функции выбора C , питаемым предъявлениями Ω .

Функция выбора C может быть задана путем задания механизма выбора, внешним описанием которого она является. В этом случае о ней говорят как о функции, порожденной данным механизмом. Одну и ту же функцию C могут порождать различные механизмы. Механизмы, порождающие одну и ту же функцию, называются эквивалентными.

Механизм выбора представляет собой пару $M = \langle \delta, \pi \rangle$, где δ – некоторая структура на множестве вариантов Ω_0 , а π – правило выбора, указывающее, как из предъявления Ω на основе структуры δ выделяется множество $C_M(\Omega) = C_{\langle \delta, \pi \rangle}(\Omega)$ выбираемых вариантов. Таким образом, общая модель выбора содержит два аспекта:

- 1) внутреннее описание;
- 2) внешнее описание (порождающий механизм выбора и порождаемая функция выбора).

Принципом, облегчающим принятие решения, является переход от сравнения альтернатив в целом к сравнению их отдельных свойств. Основная идея такого перехода состоит в том, что в отношении отдельного свойства существенно легче сказать какая альтернатива предпочтительнее.

Выделение свойств альтернатив является декомпозицией. Свойства первого иерархического уровня могут делиться на следующие наборы свойств и т.д. Глубина такого деления определяется стремлением дойти до тех свойств, которые удобно сравнивать друг с другом. После сравнения альтернатив по отдельным свойствам должен быть осуществлен обратный переход к требуемому сравнению альтернатив в целом.

Сравнение альтернатив по отдельным свойствам можно выполнить тремя способами:

- 1) на основе попарного сравнения альтернатив по данному свойству;
- 2) на основе введения естественных объективно обусловленных количественных показателей степени проявления свойств;
- 3) на основе введения искусственных объективно обусловленных числовых показателей свойств.

При попарном сравнении считается, что для двух альтернатив x_1 и x_2 из Ω каким-то образом можно произвести выбор наиболее предпочтительной по данному свойству. Способ выбора в общем случае не конкретизируется. Если он связан с использованием числовых характеристик, то такая ситуация относится ко второму или третьему из указанных выше способов сравнения. С формальной точки зрения для альтернатив x_1 и x_2 из Ω вводится бинарная операция сравнения по свойству r . Выражение $x_1 r x_2$ означает, что альтернатива x_1 предпочтительней альтернативы x_2 по свойству r . Бинарная операция может быть применена как к любой паре (x_1, x_2) из $\Omega \times \Omega$, так и не ко всем из них. В последнем случае допускается, что относительно некоторых пар выбор сделать нельзя. Для операции сравнения r естественной является аксиома транзитивности: из $x_1 r x_2$ и $x_2 r x_3$ следует $x_1 r x_3$. Дополнительно могут быть введены аксиомы антисимметричности и антирефлексивности. При выполнении аксиомы антисимметричности из $x_1 r x_2$ и $x_2 r x_1$ верно лишь одно, а при выполнении аксиомы антирефлексивности из $x_1 r x_2$ следует несовпадение альтернатив x_1 и x_2 . Естественное отношение предпочтения антисимметрично и антирефлексивно. Отношение «не хуже» этими свойствами не обладает. Для обозначения операции сравнения вместо записи $x_1 r x_2$ используют и запись $x_1 > x_2$ (предпочтение).

На основе бинарного сравнения может быть выполнена специальная операция ранжирования (упорядочения). В результате ее выполнения альтернативы в зависимости от их свойств r располагаются в определенном порядке: от наиболее до наименее предпочтительной.

Наиболее аргументированным способом выбора представляется сравнение альтернатив на основе сопоставления им числа. Здесь необходима лишь уверенность в том, что выполненное сопоставление объективно. Как правило, это имеет место, если показатель свойства обладает физическим смыслом и, следовательно, объективно обусловлен.

В задаче принятия решений следует стремиться довести декомпозицию до уровней, для которых возможны численные оценки свойств. Получение набора объективно обусловленных количественных показателей свойств альтернатив является одной из важных целей декомпозиции. К подходу, связанному с получением набора показателей свойств, прибегают и тогда, когда естественные числовые характеристики отсутствуют. В этом случае вводят искусственные балльные оценки, формируемые экспертами. После сравнения альтернатив по отдельным свойствам следует вернуться к сравнению альтернатив в целом, или выполнить операцию композиции.

Допустим, что все свойства альтернатив имеют численную оценку. Обозначим через $F_i(x)$ показатель i -го свойства альтернативы x , где $i = 1, 2, \dots, m$. В этом случае любой альтернативе может быть сопоставлена точка m -мерного пространства E_m , координаты которой есть значения соответствующих показателей. Для определенности будем считать, что чем больше значение i -го показателя $F_i(x)$, тем предпочтительнее данная альтернатива по i -му свойству. Рассмотрим две произвольные альтернативы. Возможны две ситуации:

1) одна альтернатива не хуже другой по всем показателям: $F_i(x_2) \geq F_i(x_1)$, $i = 1, 2, \dots, m$, причем хотя бы одно неравенство выполняется как строгое;

2) утверждать, что одна альтернатива не хуже другой, нельзя.

Условие $F_i(x_2) \geq F_i(x_1)$ есть естественное условие предпочтения альтернативы x_2 перед альтернативой x_1 . Таким образом, переход от x_1 к x_2 улучшает выбор.

При сравнении альтернатив возникает вопрос о том, существуют ли неулучшаемые альтернативы. Ответ на этот вопрос практически всегда положительный, для этого требуется лишь ограниченность значений показателей $F_i(x)$, $i = 1, 2, \dots, m$. Для иллюстрации воспользуемся геометрической интерпретацией. На рис. 4.1 при $m = 2$ в координатах F_1, F_2 точками или звездочками изображены альтернативы, звездочками показаны наилучшие альтернативы. Типичен случай, когда число неулучшаемых альтернатив меньше числа исходных альтернатив. Множество неулучшаемых альтернатив называется *множеством Парето* для данной задачи.

Альтернативы, не принадлежащие множеству Парето, не претендуют на то, чтобы считаться лучшей альтернативой. Выделение множества Парето является первым шагом в сравнении альтернатив. Приемов выбора альтернативы на множестве Парето, основанных на столь же естественных предположениях, как предположения, используемые при выделении самого множества Парето, не существует. Выделение единственного решения в рассматриваемой задаче выполняется при наличии дополнительной информации о предпочтении альтернатив по отношению к той информации, которая обусловлена сравнением альтернатив по каждому пока-

зателю их свойств в отдельности. Для формализации и обработки такой информации используются специальные методы, основанные на знаниях и опыте экспертов в области рассматриваемой проблемы, а также системы предпочтений ЛПР. В целом даже для случая, когда все свойства альтернатив могут быть количественно оценены с помощью соответствующих показателей свойств, выбор альтернативы оказывается достаточно сложным. Рассмотрим ситуацию, когда для части или для всех свойств альтернатив можно ввести не числовую оценку, а отношение сравнения.

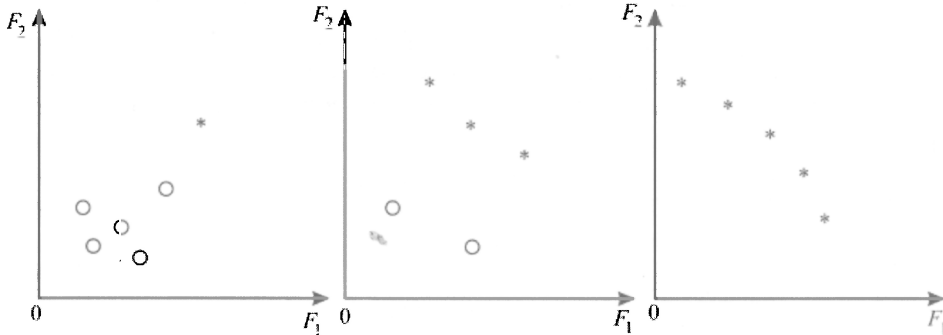


Рис. 4.1. Геометрическая интерпретация сравнения альтернатив

Пусть любая из альтернатив имеет m свойств, по каждому из которых может быть задана операция сравнения вида $x_k r_i x_l$, $i = 1, 2, \dots, m$. Примем, что отношения $r_1, r_2, \dots, r_m$ транзитивны и антирефлексивны. Допустим, что по любому отношению r_i , $i = 1, 2, \dots, m$, сравнимы две любые альтернативы из множества Ω . Тогда по каждому свойству может быть выполнено полное ранжирование альтернатив. Результатом операции полного ранжирования альтернатив будет набор перестановок из альтернатив, который можно записать в виде матрицы из m столбцов (по числу свойств) и n строк (по числу альтернатив). Например, если рассматривается задача с четырьмя альтернативами и двумя свойствами, то ранжирование альтернатив по свойствам даст

$$x_1 r_1 x_4, x_4 r_1 x_3, x_3 r_1 x_2, \\ x_4 r_2 x_3, x_3 r_2 x_2, x_2 r_2 x_1.$$

Матрица ранжирования будет иметь вид

$$\begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 4 & 3 \\ 3 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix},$$

где первая строка содержит наиболее предпочтительные альтернативы по первому (x_1) и второму (x_4) свойствам.

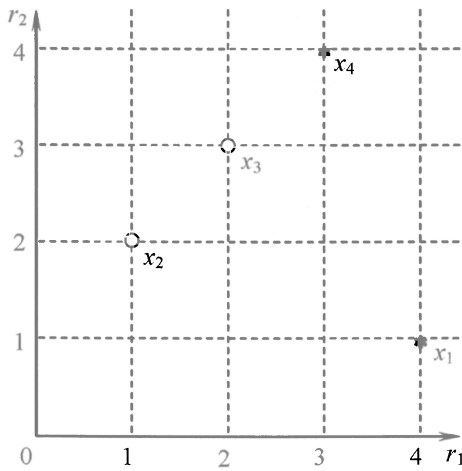


Рис. 4.2. Расположение альтернатив в условном пространстве свойств

Одним из способов работы с такой матрицей является введение условного пространства свойств. В нем в проекции на ось r_i альтернативы будут располагаться в соответствии с ранжированием по операции r_i . На рис. 4.2 показано, что наилучшими альтернативами будут альтернативы x_1 и x_4 . Более сложный случай составляет частичное ранжирование.

Пусть вместо второй строчки в

$$x_1 r_1 x_4, x_4 r_1 x_3, x_3 r_1 x_2,$$

$$x_4 r_2 x_3, x_3 r_2 x_2, x_2 r_2 x_1.$$

известно только то, что $x_4 r_2 x_3$ и $x_2 r_2 x_1$. Необходимо снова установить наилучшие альтернативы. Общий метод

состоит в выделении из всех пар альтернатив (x_k, x_l) таких, что $x_k r_i x_l$, $i = 1, 2, \dots, m$. Как только такая пара выделяется, альтернатива x_l убирается из дальнейшего рассмотрения, так как альтернатива x_k предпочтительней. В рассматриваемом примере таким способом удастся вывести из сравнения альтернативу x_3 . Большого нам неизвестно, поэтому следует считать неулучшаемыми оставшиеся альтернативы x_1, x_2, x_4 . Следовательно, частичное ранжирование ведет к росту числа неулучшаемых альтернатив. При частичном ранжировании не существует ни матрицы ранжирования, ни условного пространства свойств. Дальнейший выбор среди числа неулучшаемых альтернатив в основном производится экспертным методом.

В случае полного ранжирования с неулучшаемыми альтернативами поступают аналогично тому, как действуют с элементами множества Парето из пространства значений показателей свойств альтернатив. Это объясняется тем, что в условном пространстве свойств фактически оказалась введенной искусственная оценка – место альтернативы в столбце матрицы ранжирования.

Еще один способ выделения неулучшаемых альтернатив состоит в использовании для этой цели графов. Наиболее распространен вариант, когда вершины графа соответствуют альтернативам, а ориентированные дуги между x_k и x_l проводятся только в том случае если $x_k r_i x_l$, $i = 1, 2, \dots, m$. Такой способ подходит и для полной и для частичной упорядоченности. Он используется в случае, когда имеется всего одна операция сравнения r , т.е. возможно непосредственное (а не по свойствам) сравнение альтернатив друг с другом. В любом случае неулучшаемыми будут альтернативы, из которых выходят дуги.

Рассмотренные ситуации, возникающие при сравнении альтернатив, показывают, что представление предпочтений альтернатив и механизмы их выбора могут

быть различными. Если альтернатива оценивается единственным скалярным показателем, то сравнение альтернатив может быть осуществлено путем сопоставления численных значений показателя, причем этот показатель естественным образом позволяет упорядочить альтернативы по их предпочтительности. Альтернатива может оцениваться по нескольким количественным показателям, каждый из которых характеризует степень проявления отдельного свойства альтернативы. В совокупности эти показатели образуют векторный показатель оценивания альтернативы в целом. Сравнение альтернатив здесь должно выполняться по векторному показателю оценивания. Использование информации об альтернативах, содержащейся только в значениях компонентов векторного показателя, не позволяет выбрать единственную альтернативу. Необходима дополнительная информация, чтобы установить принцип оптимальности, основанный на некоем компромиссе, и в соответствии с ним выбрать единственное компромиссно-оптимальное решение. Наконец, возможен случай, когда количественные показатели оценивания альтернатив объективно не могут быть введены и использованы в процедуре сравнения альтернатив. В этой ситуации применяется некоторое отношение сравнения, определенное на множестве сопоставимых альтернатив.

4.7. Классификация и общая характеристика задач принятия решений при проектировании и разработке систем ВВТ

Задачи принятия решений классифицируются по нескольким признакам. Наиболее общими и существенными признаками классификации являются:

- 1) степень определенности исходной информации;
- 2) число показателей оценивания, по которым сравниваются альтернативы;
- 3) степень проявления фактора времени;
- 4) использование эксперимента для получения информации;
- 5) степень объективности модели принятия решений;
- 6) число лиц, принимающих решения.

Определенность информации характеризуется полнотой и достоверностью данных, доступных при принятии решений. Она зависит от характера внешней среды, от тех внешних воздействующих факторов, которые влияют на исход планируемого действия, решение о варианте которого требуется принять. По своей природе, а также по степени информированности о них, факторы, влияющие на исход действия, могут быть определенными и неопределенными. Определенные факторы, в свою очередь, подразделяются на детерминированно определенные и стохастически определенные факторы.

Детерминированно определенные факторы характеризуются тем, что по своей природе они не случайны и при оценивании качества альтернативных вариантов планируемого действия их значения известны. Стохастически определенные факторы характеризуются тем, что по своей природе они являются случайными процессами, величинами или событиями. При оценивании качества решений, как правило, известны их законы распределения или некоторые числовые характеристики. Неопределенные факторы характеризуются тем, что при оценивании качества ре-

шений могут быть известны лишь некоторые значения факторов из области их возможных значений или диапазон изменения значений факторов, причем никакой информации о распределении вероятностей этих значений нет.

В зависимости от характера внешней среды, кроме перечисленных групп факторов выделяют группу факторов, обусловленных воздействием активной внешней среды, проявляющейся в сознательном, целенаправленном поведении, определяемом наличием у нее собственной цели. В общем случае цели ЛПР и активной среды могут не просто отличаться друг от друга, но и быть прямо противоположными, в этом случае возникает конфликтная ситуация. Классификационный признак задач принятия решений, отражающий характер воздействующих факторов, называют признаком «определенность–риск–неопределенность–конфликтность».

В зависимости от характера внешней среды выделяют следующие группы задач принятия решений:

- задачи принятия решений в условиях детерминированной определенности;
- задачи принятия решений в условиях стохастической определенности;
- задачи принятия решений в условиях неопределенности;
- задачи принятия решений в условиях активной внешней среды и конфликтных ситуаций.

Принятие решений в условиях *детерминированной определенности* производится при наличии полной и достоверной информации о проблемной ситуации, целях, ограничениях и последствиях решений. Для данного класса задач каждая возможная альтернатива приводит к единственному исходу. Если полезность каждого исхода оценивается некоторым количественным показателем, то цель в задаче может быть представлена как получение исхода, оцениваемого возможно большим численным значением количественного показателя. Функция, заданная на множестве всех исходов и принимающая действительные значения, называется целевой функцией.

Имея цель, заданную с помощью целевой функции, можно определить связанное с этой целью предпочтение исходов: из двух исходов более предпочтительным будет тот, которому соответствует большее значение этой функции. При равных значениях целевой функции говорят о безразличии исходов между собой. Такое предпочтение называют предпочтением, связанным с *целевой функцией*.

В случаях принятия решений в условиях детерминированной определенности каждой альтернативе соответствует определенный исход, и если полезность каждого исхода оценивается численным значением некоторого количественного показателя, то можно установить прямую связь: альтернатива–численное значение соответствующего показателя, минуя сами исходы. В итоге целевая функция, заданная на множестве всех исходов, оказывается уже определенной на множестве альтернатив. Таким образом, можно сделать вывод: математической моделью задачи принятия решений в условиях детерминированной определенности с численным оцениванием исходов с помощью некоторого количественного показателя является действительная функция (целевая функция), заданная на множестве альтернатив. Нахождение оптимального решения для такой задачи равносильно нахождению экстремума (максимума или минимума) этой функции. В модель должны входить и

ограничения в виде математических соотношений, определяющих область допустимых решений. Задача принятия решений, сведенная к такой модели, по своей постановке полностью совпадает с задачами математического программирования. Поэтому весь арсенал методов, разработанных для получения решения задач математического программирования, может быть применен для определения оптимального по выбранному скалярному показателю варианта решения в условиях детерминированной определенности.

Более сложный тип связи альтернатив с исходами состоит в том, что каждая возможная альтернатива может привести к любому исходу из некоторого множества исходов, каждый из которых имеет определенную известную вероятность проявления. Здесь имеет место стохастическая зависимость исходов от альтернатив, принятие решений происходит в условиях стохастической определенности (в условиях риска). В задачах данного типа для каждой альтернативы исход заранее неизвестен, он случаен. Поэтому всегда присутствует риск получить не тот результат, на который ориентируются, выбирая определенную стратегию в расчете на усредненные характеристики случайных факторов, оказывающих влияние на исход действия.

Принятие решений в условиях *стохастической определенности* основывается на теории статистических решений. В этой теории неполнота информации в реальных задачах учитывается путем рассмотрения случайных событий, величин, процессов. Описание закономерностей поведения случайных объектов осуществляется с помощью вероятностных характеристик. Сами вероятностные характеристики являются уже неслучайными, поэтому с ними можно производить операции по нахождению оптимального решения так же, как с детерминированными характеристиками. Общим в критерии нахождения оптимального решения в теории статистических решений является средний риск, поэтому задачи данного класса называют *задачами принятия решений в условиях риска*.

Математические модели, рассматриваемые в задачах принятия решений в условиях детерминированной и стохастической определенности, в ряде случаев достаточно хорошо описывают ситуации, характерные для функционирования технических систем. Поэтому модели данного класса широко применяются для синтеза данных систем.

Если каждая возможная альтернатива может привести к любому исходу из некоторого множества исходов, причем отсутствует даже информация о стохастической зависимости исходов от альтернатив, то имеет место случай принятия решений в условиях неопределенности. Для задач такого типа вероятности исходов неизвестны либо вовсе теряют смысл.

Для *задач принятия решений в условиях неопределенности* характерна большая неполнота и недостоверность информации, многообразие и сложность влияния факторов. Эти обстоятельства не позволяют построить адекватные математические модели задачи для нахождения оптимального решения. Поэтому основную роль в поиске оптимального или приемлемого решения играет человек. Формальные методы и технические средства используются человеком в процессе формирования решений в качестве вспомогательных инструментов.

Задача принятия решений в условиях неопределенностей является более общей и включает, как частные случаи, задачи принятия решений в условиях детерминированной и стохастической определенности.

Задачи принятия решений в условиях детерминированной определенности и неопределенности – это предельные случаи задач. Задачи же принятия решений, в которых имеется элемент риска, занимают некоторое промежуточное положение.

Во многих областях человеческой деятельности, особенно часто в военном деле, приходится рассматривать проблему принятия решений в условиях неопределенности особого рода, когда имеет место конфликтная ситуация.

Под *конфликтной* понимается такая ситуация, в которой сталкиваются интересы двух или более сторон, преследующих различные цели. Причем результат любого действия каждой из сторон зависит от того, какой образ действий выберут другие стороны. Поскольку в конфликтных ситуациях каждая сторона, как правило, не располагает достаточными сведениями о том, что задумала другая сторона, решение принимается в условиях неопределенности. Конфликт не обязательно предполагает наличие антагонистических противоречий сторон, но всегда связан с определенным рода разногласиями.

Конфликтная ситуация будет антагонистической, если цели действий сторон прямо противоположны. Увеличение выигрыша одной из сторон в этом случае приводит к уменьшению выигрыша другой стороны, и наоборот.

В конфликтных ситуациях неизвестные факторы зависят от активно противодействующей внешней среды.

Выработкой рекомендаций по рациональному образу действий участников многократно повторяющегося конфликта занимается математическая теория конфликтных ситуаций – теория игр. Предметом исследования теории игр являются методы принятия решений в конфликтных ситуациях.

Теория игр – это теория математического моделирования конфликтных ситуаций. Игра в этой теории представляется как упрощенная формализованная модель реальной конфликтной ситуации. Формализация конфликтных ситуаций заключается в том, то действия сторон считаются подчиненными определенным правилам, которые называются правилами игры. Правила игры представляют возможные варианты действий, или стратегии сторон. Различным классам конфликтных ситуаций соответствуют свои методы моделирования.

Математическое моделирование конфликтных ситуаций, как и любых процессов вообще, невозможно без их схематизации, некоторого упрощения, т.е. принятия ряда допущений и ограничений. Поэтому важно на этапе содержательной постановки задачи увидеть в реальном процессе черты конфликтной ситуации, отметить особенности процесса, знание которых позволит в дальнейшем отнести конфликтную ситуацию к тому или иному классу игр, т.е. выбрать метод моделирования и определить, позволят ли допущения и ограничения данного метода теории игр достичь заданной цели моделирования.

Модели конфликтных ситуаций, изучаемые в теории игр, основаны на предположении, что мы имеем дело с разумной и дальновидной противодействующей стороной, выбирающей свое поведение наихудшим для нас (наилучшим для себя)

образом. Такая идеализация конфликтной ситуации в некоторых случаях может подсказать наименее рискованное решение, которое необязательно принимать, но следует иметь в виду.

Одной из важных областей применения теории игр является выбор наилучшего варианта действий в условиях неопределенности относительно избираемого противной стороной способа действий. Решение этой проблемы всегда включает решение частных проблем:

- оценивание возможных вариантов действий противной стороны;

- разработки рациональных вариантов использования ресурсов;

- отбора лучшего (из числа разработанных) варианта использования своих ресурсов в условиях неопределенности в отношении того, какой именно вариант действий (из числа выявленных) выберет противная сторона.

Перечисленные проблемы полностью вписываются в схему подготовки решений в условиях неопределенности с использованием методов теории игр.

Важным классификационным признаком для задач принятия решений является число показателей оценивания, по которым сравниваются исходы (альтернативы). По этому признаку задачи делятся на скалярные и векторные. В первом случае решения сравниваются по единственному числовому показателю, представленному в виде скалярной функции, заданной на множестве возможных решений. Во втором случае каждое решение оценивается набором частных показателей, каждый из которых представляется скалярной функцией, определенной на множестве решений.

В случае, когда исход характеризуется несколькими частными показателями оценивания, выбор наилучшего решения обосновывают с помощью теории векторной оптимизации.

Задачей векторной оптимизации называется задача, решаемая с учетом нескольких скалярных показателей оценивания, т.е. на основе векторного показателя, компонентами которого являются эти скалярные показатели. Задачи векторной оптимизации принципиально отличаются от задач оценивания исходов по одному скалярному показателю. Это отличие обусловлено тем, что в математике отношение порядка для векторов не установлено.

В задачах с одним показателем полная информация о предпочтениях исходов состоит в указании направления предпочтительного изменения значений скалярного показателя, принадлежащих области действительных чисел. Это объясняется тем, что в большинстве прикладных задач в качестве показателя выбирается такая функция, для которой либо большее значение всегда предпочтительнее меньшего, либо, наоборот меньшее значение предпочтительнее большего.

Так как для задач принятия решений в условиях детерминированной определенности с численным оцениваем исходов по одному показателю цель адекватна максимизации (минимизации) целевой функции, то для этих задач фактически имеется единственная концепция оптимальности решения: оптимальным будет решение, доставляющее целевой функции наибольшее (наименьшее) значения. Совершенно иной подход реализуется в случае оценки альтернатив по нескольким показателям. Для таких задач принятия решений между некоторыми частными по-

казателями возникает противоречие, суть которого состоит в том, что стремление улучшить какой-либо один частный показатель ведет к ухудшению некоторого другого, частного показателя.

Только в исключительных случаях экстремумы нескольких независимых друг от друга функций достигаются в одной точке. Типичным является случай, когда экстремумы имеют место в различных точках. На рис. 4.3 функция $F_1(x)$ достигает

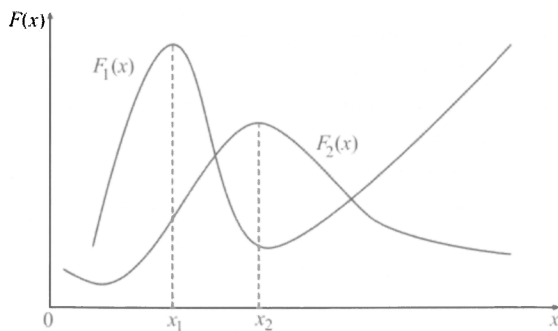


Рис. 4.3. Типичный случай расположения экстремумов

максимума в точке x_1 , а функция $F_2(x)$ — в точке $x_2 \neq x_1$ и не ясно, какую точку (какое решение) следует считать наилучшей (оптимальным). В данном случае при поиске решения сталкиваются с трудностью концептуального характера, связанной с тем, что следует понимать под оптимальным решением (в отличие от задачи принятия решения в условиях детерминированной определенности) с

одним оптимизируемым показателем, когда принцип оптимальности очевиден и возникают только трудности вычислительного характера, связанные с поиском оптимального решения.

При выборе решения в задаче с несколькими показателями оценивания следует ограничиться теми решениями, для которых невозможно одновременное улучшение всех показателей. Такие решения называются эффективными (оптимальными) по Парето. В качестве синонимов используют: недоминируемые, нехудшие, неподчиненные решения. Поэтому выбор решения следует проводить из множества эффективных решений. При этом остается неразрешенным вопрос о том, какое именно эффективное решение следует признать оптимальным.

Если считать для двух решений лучшим то, для которого все показатели лучше, то для любых двух эффективных решений ни одно не является лучше другого — эффективные решения являются несравнимыми между собой по предпочтению. Для сравнения эффективных решений потребуется привлечение дополнительной информации, помимо той, которая заключена в каждом показателе.

Понятие эффективного решения является обобщением понятия точки максимума числовой функции на случай нескольких функций. В прикладных задачах с векторным показателем оценивания множество эффективных решений является непустым. Оптимальные решения должны выбираться среди эффективных. Если в задаче со скалярным показателем в качестве оптимального можно брать любое решение, максимизирующее показатель (так как все они эквивалентны), то в задаче с векторным показателем множество эффективных решений оказывается весьма богатым неэквивалентными решениями, и для осмысленного выбора оптимального решения необходимо привлечь более полную информацию о предпочтениях.

Множество эффективных решений значительно уже, чем исходное множество всех допустимых решений. Его построение является одним из первых этапов большого числа процедур и методов векторной оптимизации. В некоторых случаях поиск решения задачи векторной оптимизации заканчивается выделением множества эффективных решений, поскольку даже это обеспечивает приемлемую для практических нужд точность получения решения.

Сужение всего множества решений до множества эффективных решений важно не только само по себе, но и потому, что на более узком подмножестве могут выполняться различные допущения о предпочтениях, которые заведомо неприемлемы для множества всех решений. Кроме того, эффективные решения могут обладать практически значимыми свойствами, не присущими остальным решениям. Это обстоятельство используется в математической экономике и теории игр.

Поскольку для векторной задачи, как правило, не существует решения, наилучшего сразу по всем частным показателям, то оптимальное решение является компромиссным. Для определения этого решения необходимо выбрать некоторый принцип оптимальности.

По признаку, учитывающему степень проявления фактора времени, задачи принятия решений делятся на статистические и динамические. В *статистических задачах* фактор времени проявляется слабо, в *динамических задачах* фактор времени существенен. Решением задачи является некоторое управляющее воздействие на динамический объект, изменяющее состояние объекта управления требуемым образом. Переменные состояния и управляющие состояния связаны уравнением управления объектом. В качестве множества допустимых альтернатив используется множество допустимых управлений. Каждому управлению ставится в соответствие скалярный или векторный показатель качества управления в форме некоторого функционала. В ограничения задачи включаются как ограничения на управления, так и ограничения на состояния управляемого объекта, которые представляются в форме уравнений движения объекта управления и системы граничных условий, наложенных на переменные состояния объекта.

Каждому варианту управления соответствует определенное значение показателя его качества. Задача оптимального управления заключается в нахождении и реализации такого варианта управления, при котором показатель качества принимает максимальное значение и выполняются ограничения, определяемые конкретными условиями управления.

По признаку использования эксперимента для получения информации задачи принятия решений делятся на две группы:

- 1) задачи принятия решений по априорным данным;
- 2) задачи принятия решений по апостериорным данным.

Принятие решений по априорным данным характерно для условий детерминированной определенности и частично для условий стохастической определенности, так как используется только известная информация. В условиях неопределенности априорная информация очень мала, поэтому необходимо получение новой информации путем проведения эксперимента. Результаты эксперимента дают апостериорную информацию.

5. МЕТОДЫ И ОРГАНИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

5.1. Цели и задачи испытаний образцов ВВТ

Любая впервые созданная сложная система должна пройти испытания для того, чтобы можно было дать ответ: насколько эффективно решает система задачу, ради которой ее создали. Получение ответа и представляет конечную цель испытаний. Однако столь общая формулировка цели испытаний требует определенной конкретизации, особенно для сложных систем, для которых этот ответ будет складываться из результатов проверки на функционирование, оценки эффективности и некоторых дополнительных оценок.

Проверка на функционирование всегда предшествует точной количественной оценке выходных характеристик для любого сконструированного прибора или собранной схемы. Функционирование системы считают нормальным, если стыковка элементов осуществлена правильно и значения входных и выходных параметров взаимодействующих элементов согласованы, а обмен информацией между ними происходит без каких-либо видимых или скрытых механических, электрических и других видов нарушений, приводящих к выходу из строя контактов, реле или иных элементов в цепи взаимодействия или в самой аппаратуре. Таким образом, качественная оценка системы, состоящая в проверке правильности ее функционирования, является первоочередной задачей при проведении испытательных работ.

Оценка эффективности системы является основной количественной оценкой и проводится с целью определения способностей системы решать задачи, для выполнения которых она была создана. Наряду с оценкой эффективности иногда интерес представляют также связи и показатели, характеризующие некоторые отдельные свойства системы (например, ремонтпригодность, удобство обслуживания и т. д.).

Целями испытаний могут быть выявление более предпочтительных принципов построения изделий и отработка предлагаемых технических решений, установление соответствия изделий тактико-техническому заданию на разработку или другой нормативно-технической документации, а также решение иных задач, требующих экспериментальных данных.

Таким образом, для получения ответа на вопрос, решает ли данная система задачу, ради которой ее создали, в ходе испытаний системы необходимо предусмотреть проверку правильности функционирования отдельных элементов и сис-

темы в целом, а также определение показателя эффективности и тех характеристик элементов и систем в целом, которые влияют на его величину.

Испытания представляют собой один из наиболее распространенных видов экспериментальных работ, выполняемых на различных этапах жизненного цикла изделий. Они проводятся при формализации облика будущего изделия в процессе предпроектных исследований, при непосредственной разработке изделия, при его доводке, приемке в эксплуатацию, в ходе эксплуатации и во многих других случаях. Испытания служат объективной основой оценивания качества изделий и принятия соответствующих решений на всех стадиях их жизненного цикла.

Необходимость испытаний определяется тем, что из-за исключительной сложности процессов функционирования и большого числа взаимосвязанных между собой параметров и характеристик изделия нельзя при выборе проектных, технических и эксплуатационных решений полагаться только на априорные представления и теоретические предположения об их изменении в различных условиях. Для подтверждения правильности выбранных и принятия новых решений необходим эксперимент-испытание.

Под испытаниями понимается процесс экспериментального определения (оценивания, контроля) количественных и качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата воздействий на него различных факторов при его функционировании, а также при моделировании объекта.

Объектами испытаний могут быть: макеты, модели, экспериментальные образцы изделий, изготовленные при выполнении научно-исследовательских работ (НИР) на стадии обоснования разработки изделий, а также при проектировании; опытные образцы изделий, изготовленные при выполнении опытно-конструкторских работ; образцы, изготовленные при внедрении или освоении изделия в производстве; образцы, изготовленные в ходе установившегося серийного или массового производства.

Испытания являются важнейшей составной частью процесса разработки образцов новой техники. Без экспериментальной отработки изделий невозможно выполнение проектирования с высоким качеством и доведение изделий до состояния соответствия заданным требованиям. Испытания выполняются при проведении НИР на стадии обоснования разработки изделий, сопровождают непосредственное (эскизное и техническое) проектирование изделий и завершают их разработку (предварительные и приемочные (государственные) испытания). При предпроектных исследованиях осуществляются исследовательские испытания математических и физических моделей (макетов), которые проводятся в лабораторных, стендовых и, при необходимости, в натурных условиях.

Основная задача испытаний состоит в оценивании потенциальных возможностей выдвигаемых новых идей и концепций при их реализации в будущем объекте. Для обоснования тактико-технических требований, включаемых в формируемое по результатам предпроектных исследований тактико-техническое задание (ТТЗ) на разработку изделия, проводится цикл испытательных работ с физическими и математическими моделями будущего изделия, основная задача которых состоит в оценивании достижимости требуемых общих технических характеристик изделия.

Испытания при непосредственном проектировании изделий также носят исследовательский характер: выявляются и уточняются принципы построения изделия и потенциальные возможности достижения требуемых тактико-технических характеристик. Объектами испытаний являются модели, макеты и экспериментальные образцы, создаваемые для проверки пригодности тех или иных принципов построения изделий, конструктивных, технических и технологических решений. Разработчик изделия, как правило, имеет возможность полностью управлять ходом таких испытаний и в процессе их выполнения вносить изменения в макет или экспериментальный образец и путем их последовательного улучшения добиваться удовлетворения заданных тактико-технических требований.

Главной целью испытаний, осуществляемых при проектировании, является объективное оценивание новых идей, концепций и технических характеристик, закладываемых в основу макетов и опытных образцов разрабатываемого изделия, а также последовательное совершенствование проектных решений. Эта цель достигается путем решения ряда задач, включающих:

- сбор данных о свойствах проектируемого объекта, которые невозможно получить расчетно-теоретическим путем;

- экспериментальную проверку и уточнение характеристик изделия, полученных с помощью расчетов;

- экспериментальное оценивание качества принимаемых проектных решений и путей их улучшения;

- оценивание и отбор существенных факторов, влияющих на эффективность функционирования изделия.

Решение перечисленных задач осуществляется в рамках исследовательских, сравнительных и контрольных испытаний, которые соответственно используются для изучения свойств будущего изделия; для нахождения конкретных значений его характеристик с заданной точностью и достоверностью; для сравнения характеристик различных вариантов изделия; для контроля качества изделия и его составляющих частей.

При непосредственном проектировании в процессе выполнения опытно-конструкторской работы последовательно реализуются эскизное и техническое проектирование, и разрабатывается рабочая конструкторская документация для изготовления опытного образца изделия. В состав работ по эскизному и техническому проектированию входят испытания макетов наиболее сложных и ответственных частей изделия в объеме, необходимом для получения дополнительной информации для формирования принципиальных и технических проектных решений.

Проектирование завершается изготовлением опытных образцов объекта проектирования. Изготовленные по рабочей конструкторской документации опытные образцы подвергаются предварительным и приемочным (государственным) испытаниям, которые проводят для проверки соответствия образцов требованиям, указанным в ТТЗ, действующей нормативно-технической документации и для обоснования предложений о возможности постановки разрабатываемых изделий на производство и принятие в эксплуатацию.

Предварительные испытания выполняются под руководством головного разработчика изделия. Они относятся к контрольным испытаниям и проводятся с це-

лью доводки опытного образца до полного удовлетворения предъявленным требованиям, предварительного оценивания боевых, технических и эксплуатационных характеристик образца и установления их соответствия требованиям ТТЗ, а также для определения готовности образца к приемочным испытаниям. Основной задачей доводочных испытаний является выявление и устранение в опытных образцах изделий конструктивных и производственных дефектов; взаимная настройка всех систем, входящих в изделие, и доведение их до полного соответствия предъявленным требованиям; окончательная отработка конструкции изделия и технологии его производства; оценивание контролепригодности изделия в производстве и эксплуатации, а также отработка состава штатных средств контроля и испытаний. После доводки изделия на этапе предварительных испытаний и принятия решения о предъявлении опытного образца на приемочные испытания начинается этап испытаний, завершающих разработку изделия.

Приемочные испытания образцов техники и их составных частей, разрабатываемых по ТТЗ заказчика, являются государственными испытаниями, которые организует заказчик, несущий ответственность за их проведение. Их выполняют во всем диапазоне условий и режимов эксплуатации, указанных в ТТЗ и конкретизированных в программе и методиках испытаний. Условия проведения испытаний максимально приближают к условиям реальной эксплуатации и боевого применения изделий. Цель государственных испытаний – проверка и подтверждение соответствия боевых, технических и эксплуатационных характеристик образца требованиям ТТЗ, а также выработка рекомендаций по боевому применению изделия и возможности принятия его на вооружение и постановки на производство.

После принятия решения о передаче изделия в производство заказчик проводит *эксплуатационные испытания* головных образцов опытной серии изделия. Цель таких испытаний: изучение наиболее характерных особенностей эксплуатации изделия; оценивание эксплуатационной эффективности и трудоемкости технического обслуживания изделия в реальных условиях применения; уточнение эксплуатационных норм расхода запасных частей, топлива, материалов и т.п.

Государственные испытания опытного образца и эксплуатационные испытания головных образцов опытной серии изделия по существу являются завершающими испытаниями изделия опытного производства, после которых оно переходит на следующую стадию своего жизненного цикла – стадию серийного производства, для которой характерны различные категории испытаний серийной продукции.

После цикла технической подготовки и освоения производства первые серийные образцы изделия проходят квалификационные испытания. Целью этих *контрольных испытаний* является оценивание готовности предприятия к выпуску данного типа изделий в заданном объеме. В производственном процессе обязательно предусматриваются приемосдаточные испытания каждого экземпляра выпускаемого изделия. По результатам испытаний этой категории принимается решение о пригодности изделия к поставкам и использованию по назначению. Для контроля стабильности качества изделий проводят периодические испытания в объеме и сроках, установленных соответствующей нормативной документацией.

Эти испытания имеют обширные программы, аналогичные программам приемочных испытаний, и им подвергаются выборочные серийные экземпляры изделий.

В процессе конструкторского и технологического совершенствования выпускаемого изделия проводят *типовые испытания* – контрольные испытания выпускаемой продукции для оценивания эффективности и целесообразности вносимых изменений в конструкцию или технологические процессы. Все эти испытания направлены на достижение главной цели данной стадии – обеспечение выпуска предприятием изделий, полностью соответствующих конструкторской, технологической и нормативно-технической документации.

Приемосдаточные, периодические и типовые испытания являются основными категориями испытаний, проводимых для контроля качества и приемки серийных изделий. При их выполнении применяют сплошной или выборочный контроль в соответствии с нормативно-технической документацией на конкретные изделия. При выборочном контроле качества в этой документации указывают план контроля, представляющий собой совокупность данных о виде контроля, об объемах контролируемой партии продукции и выборок, о контрольных нормативах и решающих правилах.

На стадии эксплуатации предусматриваются работы по техническому обслуживанию, контролю и диагностике технического состояния, а также восстановление неисправных элементов изделий. Целью *испытаний*, проводимых *на данной стадии жизненного цикла изделия*, является оценивание технического состояния эксплуатируемого изделия для обеспечения максимальной эффективности его применения по назначению. При этих испытаниях изделие работает в реальных условиях эксплуатации. Испытания проводятся при значительно меньшем объеме контролируемых параметров. Деятельность персонала строго регламентирована эксплуатационной документацией на изделие. При проведении испытаний должны накапливаться статистические данные, необходимые для установления закономерностей перехода различных неисправностей в отказы.

На стадиях эксплуатации и капитального ремонта для устранения неисправностей и восстановления технического ресурса изделия подвергаются текущему, среднему и капитальному ремонту. После ремонта проводится комплексный контроль, регулировка и испытания средствами и методами, аналогичными производственным испытаниям. В процессе ремонтных испытаний выявляются неисправности, которые не были обнаружены в процессе контрольных операций при ремонте и сборке изделий. Далее осуществляется цикл регулировочных операций для обеспечения требуемых значений характеристик изделий. После этого проводится окончательный контроль изделий и передача их в эксплуатацию или перевод в режим нормального функционирования в соответствии с назначением изделий.

Все многообразие испытаний изделий, выполняемых на различных стадиях их жизненного цикла, принято делить на несколько видов. Испытания классифицируют по их назначению (исследовательские, контрольные, сравнительные, определительные), уровню проведения (государственные, межведомственные, ведомственные), по этапу разработки изделия (доводочные, предварительные, приемочные), по назначению испытаний готовой продукции (квалификационные, предъявительские, приемосдаточные, периодические, инспекционные, типовые, аттеста-

ционные, сертификационные), условиям и месту проведения (лабораторные, стендовые, полигонные, натурные, с использованием моделей, эксплуатационные), продолжительности (нормальные, ускоренные, сокращенные), по виду воздействия (механические, климатические, тепловые, радиационные, электрические, электромагнитные, магнитные, химические, биологические), по результату воздействия (не разрушающие, разрушающие, на стойкость, на прочность, на устойчивость), по определяемым характеристикам объекта (функциональные, на надежность, на безопасность, на транспортабельность, граничные, технологические). Испытания могут иметь два и более признаков классификации из перечисленных.

Важную роль в военно-научных исследованиях играют исследовательские испытания. Они проводятся для изучения характеристик свойств объектов. Их целями являются:

- оценивание показателей качества функционирования испытываемого образца в определенных условиях его применения;

- выбор наилучших режимов применения объекта в определенных условиях его применения;

- выбор наилучших режимов применения объекта или наилучших характеристик свойств объекта;

- сравнение множества вариантов реализации объекта при проектировании и аттестации;

- построение математической модели функционирования объекта (оценивание параметров математической модели);

- отбор факторов, существенно влияющих на показатели качества функционирования объекта;

- выбор вида математической модели объекта среди заданного множества вариантов.

Исследовательские испытания в зависимости от целей их проведения разделяются на следующие виды: определительные, сравнительные, оптимизационные, идентифицирующие, отсеивающие, дискриминирующие.

Определительные испытания проводятся для определения показателей качества объекта с требуемой точностью и достоверностью.

Оптимизационные испытания – это испытания, проводимые с целью выявления наилучших или наихудших характеристик объекта либо наилучших и наихудших режимов его применения.

Целью *сравнительных испытаний* является сравнение характеристик свойств аналогичных объектов.

Идентифицирующие испытания предназначены для построения математической модели объекта.

Отсеивающие испытания служат для отбора факторов, значимо влияющих на качество функционирования объекта.

Дискриминирующие испытания – это испытания, проводимые с целью выбора вида математической модели объекта из заданного множества моделей.

При многоцелевом характере исследовательских испытаний возможно появление новых видов испытаний, образованных сочетанием двух и более видов, пе-

речисленных выше. Например, испытания могут проводиться с целью построения математической модели и определения оптимальных режимов применения объектов, выбора вида модели и определения параметров выбранной модели.

5.2. Организационные, методические основы и технология испытаний образцов ВВТ

Для получения оценок основных характеристик созданной системы необходимо выбрать такие условия испытаний, которые позволяют обнаружить и зафиксировать ее реальные свойства и особенности. При этом в ходе испытаний проводится проверка соответствия показателей, характеризующих реальные свойства и особенности испытываемой системы, заранее установленным нормам и требованиям (по ГОСТу, техническим условиям (ТУ), нормам и т. д.). На каждом этапе создания системы отрабатываются свои конкретные задачи, а технология и организация испытательных работ должны учитывать принятую последовательность разработки системы.

Выбор конкретных испытаний, подготовка, организация и непосредственное их проведение для сложных систем — очень трудоемкий процесс. Сложные системы в большинстве случаев не допускают каких-либо натурных экспериментов в требуемом виде и в полном объеме для получения искомых оценок. Но даже если какая-нибудь вновь созданная сложная система и может допустить ограниченные натурные эксперименты без какого-либо значимого ущерба, то их организация и проведение оказываются чрезвычайно сложным мероприятием, требующим длительного времени и больших материальных затрат. Поэтому нельзя рассчитывать на набор необходимого объема статистики для получения оценок искомых характеристик и параметров путем только натурных экспериментов.

Решая задачу о выборе этапов испытаний, необходимо учитывать возможность проведения натурных экспериментов, наличие и оснащенность испытательной базы, допустимые условия работы средств обеспечения и измерения регистрируемых параметров, возможности применения других методов для оценки искомых характеристик и параметров, разбиения системы на отдельные подсистемы с целью проведения испытаний по частям и т. д. В связи с этим состав испытываемых средств на том или другом этапе испытаний, решаемые при этом задачи, необходимое обеспечение и целый ряд других вопросов могут быть конкретизированы только с учетом специфических особенностей системы в каждом отдельном случае.

При выборе этапов испытаний системы следует также учитывать возможность возникновения организационных трудностей: в связи с многочисленностью разнообразных составных элементов к разработке системы привлекают большое число предприятий, конструкторских бюро и учреждений. Увязка их деятельности должна включать не только согласование технических решений, но и соответствующий выбор этапов, объема и сроков испытаний. Отсутствие согласованности в этих вопросах, как следует из практики, может привести к нарушению и даже срыву намеченной последовательности операций, а порой к необходимости привлечения дополнительных резервов и специалистов более высокой квалификации, так как устранить неувязки иногда сложнее, чем выполнить работу с самого начала.

При выборе этапов испытаний системы необходимо руководствоваться правилом постепенного наращивания средств с переходом от менее сложного к более сложному этапу. Обычно вначале проводят лабораторные и автономные испытания отдельных элементов системы, в ходе которых стремятся установить соответствие полученных характеристик этих элементов требуемым значениям, а также готовность испытываемого элемента к переходу на этап комплексных испытаний. Затем следуют комплексные испытания. Однако часто комплексные испытания могут быть начаты с группой средств, образующих автономную подсистему, с постепенным наращиванием состава средств до полного комплекта, соответствующего испытываемой системе.

Выбранную последовательность решаемых задач, конкретизацию всех вопросов, связанных с организацией и проведением испытаний, фиксируют в различной технической документации, разрабатываемой до начала испытаний (ТУ, программы и методики испытаний, методики обработки и т. д.). Основные документы для организации и проведения испытаний – те, в которых указывают объем и методы проводимых работ и сроки их выполнения (например, постановления и решения с перечнем директивных сроков, программы и методики испытаний, а также планы текущих работ). Эти документы следует особо тщательно прорабатывать с привлечением научно обоснованных методов. В обычных календарных планах, как правило, указывают виды работ и сроки их выполнения участниками и ответственными исполнителями. Такой план как бы закладывает организационные начала для развертывания предстоящего комплекса работ.

Программа испытаний в отличие от календарного плана имеет уже организационно-технический характер. В ней отражаются: цель, условия и методы испытаний, необходимые измерения, привлекаемые средства, степень ответственности исполнителей, отчетность и контрольные сроки.

Методика проведения того или иного вида испытаний раскрывает способ технического решения поставленной задачи при испытаниях. В ней оговариваются конкретные условия и оборудование, необходимые для определения того или иного параметра (ряда параметров), возможные способы реализации этих условий, необходимые измерения, число опытов, методы обработки результатов измерений, целесообразность применения того или иного математического аппарата для получения искомого параметра по результатам непосредственных и косвенных измерений, методы анализа и оценки полученных результатов.

Содержание методики может раскрывать как способ решения основной технической задачи, технологической последовательности проведения отдельных этапов (или всего комплекса испытательных работ), так и способ проведения проверки отдельных показателей и характеристик создаваемой системы. Обычно методика составляется так, чтобы можно было получить не только искомые зависимости, но и данные, способствующие полному уяснению физического содержания исследуемого явления. Чем обоснованнее и продуманнее составлена методика, тем будет меньше непроизводительных затрат времени и материальных средств.

В ряде случаев методика может носить общий характер, раскрывающий способ проведения исследования в целом и отражающий совокупность и последователь-

ность приемов или отдельных экспериментов на ряд этапов испытаний. Иногда подобный документ называют общими методическими положениями. Но вместе с тем в практике испытаний необходимы частные методики, разрабатываемые для средств системы в интересах получения их конкретных характеристик и показателей.

К планирующим документам относят также и сетевые графики, которые дают полное представление о технологической последовательности проведения работ в течение рассматриваемого промежутка времени. Своевременная их разработка позволяет не только детально представить будущий технологический процесс, но и дает возможность заранее предусмотреть и подготовить необходимые средства измерения и материального обеспечения.

5.3. Анализ требований к организации испытаний образцов ВВТ

Значительные размеры материальных затрат, тесная производственная связь и взаимозависимость множества организаций и предприятий, входящих в кооперацию исполнителей, значимость, а зачастую и государственная важность создаваемых сложных систем требуют четкой организации работ, проводимых при испытаниях. Успех в организации работ зависит от правильного планирования всего их комплекса и управления деятельностью людей, выполняющих эти планы (именно планирование и управление составляют основное содержание процесса руководства, которое и предопределяет то или иное качество организации работ). Разработанные планы должны быть в достаточной степени достоверными, чтобы обеспечить прогнозирование хода работ, и должны содержать последовательность работ, близкую к оптимальной.

Часто планирование работ осуществляют с помощью графиков совмещенных работ, которые с указанием более или менее детального перечня работ и сроков исполнения составляются на один-два месяца, иногда на полгода или год. Графики на более длительные сроки включают позиции, объединяющие объем работ по нескольким этапам. Чем больший срок охватывается таким графиком, тем менее точно указываются перспективные сроки и тем большее число различных факторов оказывается неучтенным.

Графики совмещенных работ «статичны». На небольшом отрезке времени отрицательное свойство «статичности» не проявляется в достаточной мере, но при планировании на большие отрезки времени становится заметным. Со временем меняются условия, появляются непредвиденные факторы, влияющие на ход работ и требующие ревизии и корректировки намеченных ранее сроков, т. е. возникает потребность в составлении нового графика, учитывающего все эти изменения. Однако такая корректировка запаздывает и утвержденные соответствующими инстанциями графики превращаются в формальный, а иногда даже дезорганизующий документ, лишенный какой-либо реальной основы. К недостаткам подобных графиков относится и то, что руководители работ иногда имеют очень ограниченную, а порой и недостаточно объективную информацию и при различного рода срывах вынуждены принимать решение, которое часто оказывается далеко не оптимальным и приводит к появлению «жестких» или «волевых» сроков.

Таким образом, для четкой организации работ по вводу в строй сложных систем к планированию должны предъявляться высокие требования. В настоящее время эффективное планирование не может быть осуществлено усилиями только узкого круга отдельных лиц из числа специалистов или руководителей. Оно будет успешным лишь в случае, если проводится на базе обобщения, анализа и оценки данных, поступающих от всех специалистов, работающих на различных уровнях руководства. При планировании необходимо:

- охватывать весь объем работ и все связи между операциями от начала и до конца процесса ввода сложных систем в строй;

- обеспечивать четкую согласованность и взаимную увязку по срокам завершения работ при лучшей структуре технологического цикла;

- предусматривать возможность проведения оперативной корректировки намеченного плана по результатам непрерывного контроля за ходом работ с учетом перспектив выполнения его на весь технологический цикл;

- учитывать принятую структуру руководства и организации работ; особенно-сти задач, связанных с процессом ввода сложных систем в строй; оперативно вносить в корректируемый план возможные конструктивные изменения и доработки аппаратуры, предлагаемые разработчиком в ходе испытаний.

На основании исходного перспективного планирования соответствующие руководящие органы принимают решения, определяющие директивные сроки создания системы. Учитывая важность этого момента, необходимо с особой тщательностью отнестись к решению следующих задач:

- уточнению общего объема работ и научному обоснованию сроков завершения всего процесса в целом и отдельных его этапов;

- определению наиболее рациональной последовательности выполняемых работ, уточнению взаимосвязей и установлению степени срочности выполнения отдельных видов работ;

- оценке объема заказов в промышленности с определением необходимой мощности заводов-изготовителей и выбору кооперации организаций-исполнителей;

- установлению численности и квалификации специалистов и распределению требований в рабочей силе по времени;

- оценке необходимых ассигнований и наиболее разумному их распределению по срокам.

Неполное или некачественное решение перечисленных задач может повлечь за собой дезорганизацию всех работ по вводу в действие системы.

5.4. Выбор методов испытаний образцов ВВТ

Натурный эксперимент представляет собой наилучший способ получения искомых характеристик при испытаниях. В этом случае исследуются свойства объекта в реальных условиях и все зависит лишь от того, насколько возможно осуществить активное изменение контролируемых и управляемых условий при многократном повторении экспериментальных исследований. К сожалению, на практике подобные

возможности существенно ограничены, особенно если приходится иметь дело со сложными объектами, для испытания которых необходимы большие затраты времени и материальных ресурсов как на создание, так и на привлечение дорогостоящего, порой уникального оборудования. Поэтому вполне оправданы попытки поиска других способов получения искомых характеристик испытываемого объекта. В частности, можно воспользоваться моделированием реального процесса, когда исследования и оценка характеристик проводятся на моделях (физических или математических).

Модель, с требуемой точностью отражающая наиболее существенные стороны реального объекта, обеспечивает возможность проведения более широких исследований при несравнимо меньших материальных затратах. Большая гибкость в выборе условий испытаний, практическое отсутствие ограничений в наборе статистического материала, возможность более полного учета априорной информации существенно дополняют преимущества метода моделирования.

Вопросы обеспечения требуемой точности моделирования накладывают определенные требования на основные принципы и этапы конструирования моделей в интересах решения задач испытаний. Модель должна представлять собой упрощенное отображение реального объекта и вместе с тем адекватное отображение тех свойств, которые подлежат рассмотрению. Это противоречивое до некоторой степени требование наряду с желанием достигнуть абсолютной точности воспроизведения исследуемого физического процесса приводит иногда к серьезным ошибкам, допускаемым в ходе разработки моделей. В ряде случаев модель создается настолько громоздкой и сложной, что для получения одной реализации требуется значительное машинное время. В таких случаях из-за наличия помех и возможных сбоев модель может оказаться неработоспособной. Поэтому для удовлетворения требований по точности моделирования необходимо идти не по пути усложнения и подробного описания предмета исследований, а по пути правильной технологической последовательности обработки моделей.

При разработке первоначальной структуры модели на основе имеющейся априорной информации о системе и задачах испытаний необходимо руководствоваться принципом создания структуры предельной простоты. Этого можно достичь при правильном подходе к отбору релевантных факторов и при соответствующем выборе наиболее рациональной схемы для описания основных соотношений между рассматриваемыми переменными. Первоначально принятая структура модели в дальнейшем неизбежно претерпит различного рода изменения. Ее совершенствование возможно после уточнения значений параметров модели по результатам сопоставления выходных данных, полученных при моделировании и натурном эксперименте. Таким образом, требование обеспечения точности моделирования приводит к необходимости некоторого изменения установившейся последовательности при разработке моделей и дополнения ее специальным этапом — этапом калибровки.

На рис. 5.1 приведена схема последовательности операций при разработке моделей, когда вопрос о необходимой точности результатов моделирования не ставится так остро, как в данном случае. На рис. 5.2 представлена уже видоизмененная схема последовательности операций при разработке моделей, когда особое

внимание уделяется обеспечению, с одной стороны, работоспособности модели, а с другой стороны – удовлетворению требований по точности. Аналогично обстоит дело и при использовании физического моделирования.



Рис. 5.1. Схема последовательности операций при разработке моделей

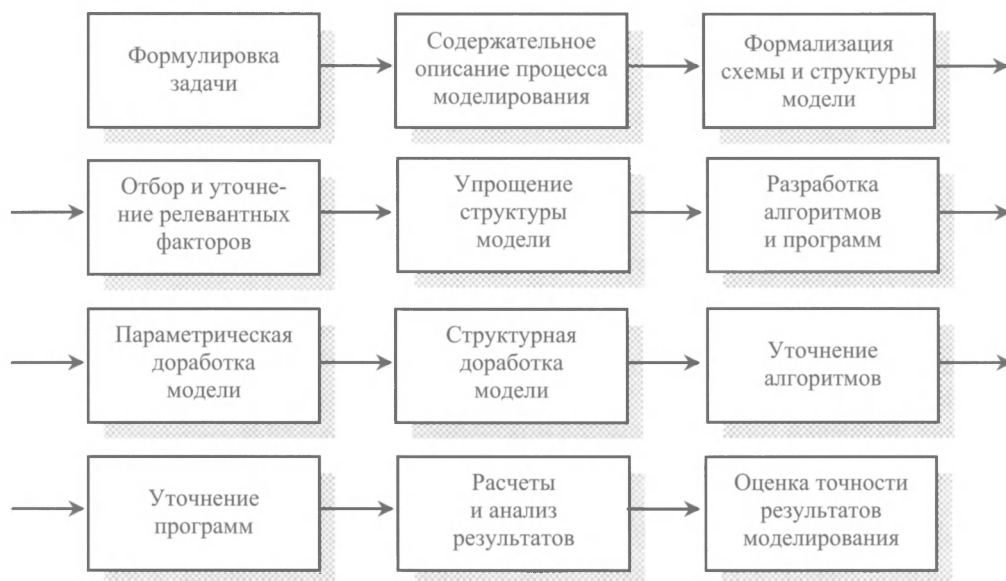


Рис. 5.2. Видоизмененная схема последовательности операций при разработке моделей

Ценность *методов имитации* в том, что они позволяют вести исследование в случаях, когда реальное воспроизведение процесса по тем или другим соображениям нежелательно или невозможно, а аналитическое описание недоступно или затруднительно. В большинстве практических случаев имитаторы используют при проведении испытаний на реальной системе, заменяя ими отдельные элементы. Однако для обеспечения требуемой точности моделирования имитаторы также должны быть откалиброваны по результатам натурных экспериментов.

Большое практическое значение имеют *стендовые испытания*, проводимые на специально оборудованных стендах с целью снятия существенно важных характери-

стик отдельных частей конструкции или некоторых агрегатов испытываемого объекта. Обычно в условиях стендовых испытаний проверку можно проводить под воздействием различных температурных режимов, избыточного давления, деформирующих усилий и вибраций. Подобные испытания позволяют проверить их работу при воздействии различных факторов, что не всегда можно воспроизвести при натурных экспериментах. В этом случае отдельные параметры могут быть измерены непосредственно с достаточно высокой точностью с привлечением более совершенной измерительной аппаратуры, что существенно при проведении анализа результатов испытаний, так как способствует более правильному пониманию и оценке протекающих процессов. Результаты стендовых испытаний, так же как и результаты испытаний с применением имитаторов, используются в качестве исходных данных для разработки математических моделей и проведения моделирования.

Таким образом, при испытаниях сложных систем наряду с натурными экспериментами могут применяться имитаторы и математическое моделирование. Разумное сочетание этих методов испытаний обычно позволяет оценивать характеристики эффективности системы во всех условиях ее практического использования. Учитывая это, можно сформулировать задачу выбора метода и числа экспериментов с целью получения необходимых оценок в каждой назначенной точке факторного пространства. Методику постановки подобных задач продемонстрируем на примере, когда по результатам всех видов испытаний находят один скалярный параметр $x(\theta)$.

Пусть оценка искомого параметра по результатам натурных экспериментов имеет вид

$$x_1(\theta) = x(\theta) + b_1(\theta) + \xi_1(\theta),$$

где $x(\theta)$ – истинное значение параметра; $b_1(\theta)$ – систематическая ошибка; $\xi_1(\theta)$ – случайная составляющая ошибки.

Если провести испытания с помощью имитатора и математического моделирования, то оценки того же параметра можно представить в виде

$$x_2(\theta) = x(\theta) + b_2(\theta) + \xi_2(\theta);$$

$$x_3(\theta) = x(\theta) + b_3(\theta) + \xi_3(\theta),$$

где $b_2(\theta), b_3(\theta)$ и $\xi_2(\theta), \xi_3(\theta)$ – соответственно систематические и случайные составляющие ошибок.

Для этих условий результирующую оценку можно найти с помощью метода «взвешенной» обработки:

$$x^*(\theta) = \sum_{k=1}^3 p_k x_k^*(\theta),$$

где $p_k = \frac{n_k}{N}$ – весовые коэффициенты ($N = \sum_{k=1}^3 n_k$ – общее число реализаций; n_k – число реализаций для k -го метода испытаний).

Точность оценки $x^*(\theta)$ можно охарактеризовать величиной

$$\nu_2\{x^*(\theta)\} = \sum_{k=1}^3 p_k \nu_2\{x_k^*(\theta)\},$$

где ν_2 – второй момент.

В данном случае

$$\nu_2\{x^*(\theta)\} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^3 n_k [D\{x_k(\theta)\} + b_k^2(\theta)],$$

где $D\{x_k(\theta)\}$ – дисперсия единичных измерений параметра $x(\theta)$ для различных методов испытаний.

Тогда задача выбора методов испытаний и числа экспериментов на различных этапах испытаний состоит в нахождении решений уравнения

$$\nu_2\{x^*(\theta)\} = \min_{n_k}, \quad k = 1, 2, 3,$$

при наличии ограничений

$$\sum_{k=1}^3 c_k n_k \leq C,$$

где c_k – стоимость одной реализации для k -го метода испытаний; C – выделенная сумма средств.

Поиск экстремума $\nu_2\{x^*(\theta)\} = \min_{n_k}, \quad k = 1, 2, 3$ можно осуществить, используя существующие методы оптимизации.

Для получения оценки выбранного показателя эффективности необходимо в ходе испытаний произвести оценку параметров и характеристик отдельных элементов с учетом влияния всевозможных факторов, относящихся к внешним условиям.

При организации и проведении испытаний относительно простых систем можно ориентироваться на получение всех исходных характеристик и показателей в ходе натурных экспериментов. Для этого обычно создают опытный образец, на котором проводят все необходимые испытания, а затем на основании полученных характеристик принимают решение о массовом производстве или о выпуске определенной серии.

Для сложных систем подобный подход при организации испытаний иногда оказывается неприемлемым. Например, трудно представить, чтобы можно было специально в целях испытаний создать опытный образец эксклюзивной крупной территориально разнесенной автоматизированной системы управления войсковым объединением. Такой эксперимент привел бы к огромным дополнительным материальным затратам и значительному увеличению сроков ввода системы в эксплуатацию. Если считать, что процесс создания сложной автоматизированной системы

длится несколько лет, то подобное увеличение сроков ввода может привести к тому, что принятые конструктивные и технические решения морально устареют раньше, чем завершится ввод системы в эксплуатацию.

При решении вопросов, связанных с организацией и проведением испытаний сложных систем, следует иметь в виду, что иногда невозможно организовать экспериментальную проверку создаваемой сложной системы, даже если она представлена в виде опытного образца. Так как проведение экспериментов на сложных системах связано с некоторыми трудностями и требует больших материальных затрат и длительных сроков, а в ряде случаев вообще практически невозможно, то возникла необходимость в разработке *опытно-теоретического метода* оценки эффективности. Основные положения этого метода оценки эффективности следующие:

- содержательное описание задачи, связанной с оценкой эффективности, представляющее собой первый шаг на пути к ее формализации;

- уточнение степени и характера функциональной зависимости показателя эффективности от характеристик отдельных элементов системы и внешних условий;

- установление обобщенных параметров;

- определение требований по точности и достоверности искомых оценок;

- отбор релевантных факторов по априорным данным;

- определение условий испытаний с помощью факторного планирования и выбор соответствующих методов оценки искомых характеристик. При этом предусматривают использование различных способов получения информации о средствах и системе в целом (математическое моделирование, применение имитаторов, натурный эксперимент);

- обоснование и выбор приемлемого состава и структуры необходимых математических моделей и имитаторов;

- планирование и организация натуральных экспериментов, обоснование объема испытаний и необходимого числа экспериментов;

- отработка и калибровка математических моделей по результатам натуральных экспериментов;

- оценка показателей эффективности.

Отличительной чертой опытно-теоретического метода является то, что он позволяет оценивать как отдельные характеристики элементов в самой системе, так и характеристики системы в целом в виде показателя эффективности в широком диапазоне его изменения. При этом одновременно решается задача о наиболее рациональном использовании ограниченного числа натуральных экспериментов, включая задачу увязки результатов экспериментов с результатами моделирования.

В существующих в настоящее время методах оценку эффективности проводят в ограниченном числе точек факторного пространства, которые выбирают на основе интуитивных соображений, исходя из стремления выбрать наиболее «тяжелые» или «наихудшие» условия или режимы. При этом подразумевают (без каких-либо обоснований), что оценки искомых параметров по всему факторному пространству не будут хуже значений, полученных в выбранных точках. Для сложных систем такой подход несостоятелен по следующим причинам:

трудно выбрать точки, в которых следует проводить оценку эффективности (большой диапазон изменения факторов, влияющих на выбор условий оценки, их многочисленность затрудняют выбор «наихудших» режимов);

ограничения, накладываемые на возможность проведения натурных экспериментов, значительно сужают область, допустимую для выбора точек, и далеко не все точки, соответствующие «наихудшим» условиям, могут попасть в нее. Поэтому при опытно-теоретическом методе число точек в факторном пространстве, параметры и характеристики значимых факторов выбирают не из соображения выбора «наихудших» условий, а из условия получения или подтверждения априорно выбранной искомой зависимости, для чего используют идеи факторного планирования.

«Активное» планирование экспериментов сводится к отысканию оптимальных условий с применением методов дисперсионного и регрессионного анализов. Часто для отыскания оптимального плана проведения экспериментов зависимость выбранного показателя от значимых факторов может быть представлена в виде полинома

$$y = b_0 + \sum_i b_i x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j + \sum_i b_{ii} x_i^2 + \dots$$

с коэффициентами регрессии $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}, \dots$.

Используя метод наименьших квадратов, можно получить оценки коэффициентов уравнения регрессии; применение же идей факторного планирования способствует при этом выбору оптимальной стратегии, т. е. достижению наиболее точного представления искомой зависимости по результатам наименьшего числа целенаправленно спланированных экспериментов. Последнее возможно за счет того, что в каждом эксперименте одновременно варьируются все переменные. Поэтому, обрабатывая результаты наблюдений всех запланированных экспериментов, получают оценки коэффициентов уравнения регрессии с наименьшей дисперсией. Число экспериментов определяется числом независимых переменных $x_1, x_2, \dots$ и числом уровней варьирования этих переменных. Иногда достаточно, если варьирование независимых переменных производится на двух уровнях. Для получения независимых оценок коэффициентов уравнения регрессии целесообразно, чтобы уровни рассматриваемых факторов были симметричны относительно начала координат.

Таким образом, число экспериментов определяется числом всех неповторяющихся комбинаций, которые можно составить из рассматриваемых независимых переменных, имеющих по два уровня. Если осуществляют все возможные и неповторяющиеся комбинации, то получают полный факторный эксперимент. На практике часто можно ограничиться реализацией матрицы планирования, содержащей лишь часть полного факторного эксперимента.

Сущность применения дробного факторного эксперимента сводится к сокращению числа членов полинома за счет смешивания (к совместной оценке некоторых коэффициентов уравнения связи). В случае, если априорная зависимость не может быть представлена в виде линейной функции, используют полином более высокой степени. Поскольку на практике стараются ограничиться полиномом не выше второй степени, то при планировании и выборе точек следует предусмотреть

варьирование независимых переменных на трех уровнях. Тогда оптимальным будет план, полученный с помощью центрального композиционного планирования, включающего в себя полный факторный эксперимент и некоторое дополнительное число точек, зависящее от числа рассматриваемых факторов.

Таким образом, с помощью «активного» планирования экспериментов можно назначить минимальное число точек в рассматриваемом факторном пространстве, в которых следует осуществить эксперименты. Соответствующая обработка результатов экспериментов в этих точках дает искомое математическое описание зависимости с требуемой точностью.

Однако минимальное число точек, полученное при таком подходе, не означает, что их будет мало, не исключаются также ограничения на возможность проведения эксперимента. Поэтому, чтобы иметь необходимые результаты во всех выбранных точках оптимального плана, необходимо использовать и другие методы получения характеристик, в частности математическое моделирование. В общем случае, для моделирования любого реального процесса можно построить множество различных моделей, отличающихся друг от друга той или иной степенью упрощения и приближения к оригиналу. В опытно-теоретическом методе применяют модели, учитывающие в своей структуре лишь те факторы и связи, значимость которых заметна по результатам. Но так как оценка значимости тех или иных факторов, а также и степени упрощения моделей не может быть получена на основе общих рассуждений, то используют метод отработки моделей, позволяющий произвести оценку точности результатов моделирования. Суть этого метода сводится к выполнению следующей последовательности операций:

на основе априорных данных с учетом характера задач, для решения которых предназначается создаваемая модель, выбирают тип и структуру модели (полная, неполная, частная) и отбирают релевантные факторы;

для одних и тех же условий работы сложной системы делают несколько натуральных экспериментов и набирают достаточное число реализаций на моделях. На основании сравнения результатов экспериментов и моделирования проводят параметрическую доработку модели при допущении, что ее выбранная структура удовлетворительна;

при наличии остаточной разности между выходными характеристиками после параметрической доработки по результатам сравнения данных эксперимента и моделирования проводят структурную перестройку модели, заключающуюся в дополнительном учете отдельных факторов, значимость которых подтвердилась или же сводилась к изменению и дополнению в структурной схеме модели отдельных связей;

окончательно проверяют статистическую совместимость выходных характеристик по результатам натуральных экспериментов и моделирования в ряде целенаправленно выбранных точек факторного пространства. Результаты в этих точках должны дать ответ не только об их статистической совместимости, но и о характере поведения возможной методической ошибки моделирования во всей области рассматриваемого факторного пространства.

Подобный подход, как показала практика, позволяет создать работоспособную модель сложной системы и достичь требуемой точности результатов моделирования.

5.5. Выбор условий испытаний образцов ВВТ

При испытаниях относительно простых систем выбор условий испытаний сводится к выбору нескольких точек в рассматриваемом факторном пространстве, исходя из соображений создания «наихудших» или наиболее «тяжелых» условий. В недалеком прошлом при испытаниях самолета-истребителя такие условия можно было создать, проведя полеты на «малых» и «больших» высотах. При этом полеты на «малой» высоте, где реализуются большие скоростные напоры, позволяли проверить скоростные и прочностные характеристики самолета, а режимы полета на больших высотах были интересны с точки зрения оценки эффективности действия аэродинамических рулей. Однако такой интуитивный подход к выбору условий испытаний имеет ряд недостатков, среди которых следует отметить неполный учет взаимной зависимости различных факторов. Поэтому в настоящее время в ряде отраслей отечественной промышленности получили широкое развитие идеи, направленные на использование дисперсионного и регрессионного анализов в целях «активного» планирования экспериментов. Основные результаты, достигнутые в этом направлении, связаны с решением экстремальных задач и сводятся к отысканию оптимального плана проведения экспериментов, позволяющих получить наиболее полное математическое описание исследуемого процесса.

При проведении испытаний любого объекта с целью оценки некоторой его характеристики обычно стремятся создать такие условия, которые способствуют выявлению влияния факторов, находящихся в функциональной связи с этой искомой характеристикой. В соответствии с этим при выборе условий испытаний необходимо, во-первых, знать эту функциональную зависимость, а во-вторых, предусмотреть изменения факторов в каких-то определенных пределах, зависящих как от существующих ограничений, так и от условий решаемой задачи.

Граничные значения факторов $x_{i_{\min}}$ и $x_{i_{\max}}$ определяют область существования в данном факторном пространстве всех возможных сочетаний значений рассматриваемых факторов. Таким образом, когда говорят о выборе условий испытаний, то подразумевают необходимость:

отбора факторов x_i , влияющих на искомую характеристику и описание зависимости;

установления диапазонов изменения факторов $x_{i_{\max}} - x_{i_{\min}}$;

определения координат точек факторного пространства $\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_k\}$, в которых следует проводить эксперименты;

оценки необходимого числа и порядка реализаций экспериментов.

Для АСУ зависимость функции отклика от независимых переменных, как правило, слишком сложна и поэтому трудно поддается простому аналитическому описанию. Часто в таких случаях прибегают к аппроксимации зависимой переменной в виде полинома. Например, аппроксимация полиномом второго порядка функциональной зависимости от одной независимой переменной (однофакторная модель) может быть представлена в виде

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_{11} x_1^2.$$

Более сложные объекты требуют применения полиномиальных моделей с большим числом учитываемых факторов и большим порядком полинома. Так, модель второго порядка с учетом зависимости от k факторов будет иметь вид

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j.$$

Сформулировать однозначные рекомендации о выборе необходимой степени полинома трудно, поэтому один и тот же объект вполне может быть описан различными моделями. При выборе вида полинома (или вернее даже типа регрессионной модели) необходимо руководствоваться характером исследуемого физического процесса. На практике больше стремятся к использованию линейной модели, прибегая в необходимых случаях к допустимым преобразованиям. Например, полиномиальные модели второго порядка

$$y = \sum_{i=0}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j$$

могут быть преобразованы к линейному виду, если $x_i = z_i$; $x_i x_j = z_{ij}$. В результате получим модель множественной линейной регрессии:

$$y = \sum_{i=0}^k b_i z_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} z_{ij}.$$

Функция отклика может иметь более сложную зависимость от рассматриваемых переменных. Некоторые из них путем преобразования удастся привести к линейному виду. К последним относятся, например, мультипликативная регрессионная, экспоненциальная, «обратная» и некоторые другие модели. Например, мультипликативную регрессионную модель вида

$$y = b_0 \prod_{i=1}^k (x_i)^{b_i}$$

можно преобразовать в линейную модель с помощью операций логарифмирования и введения новых обозначений. Положив $\ln(y) = z$; $\ln(x_i) = z_i$; $\ln(b_0) = z_0$ и прологарифмировав, получим

$$z = z_0 + \sum_{i=1}^k b_i z_i.$$

Аналогично экспоненциальная модель

$$y = \exp \left(b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i \right)$$

преобразуется к линейному виду, если прологарифмировать обе части уравнения и ввести обозначение $\ln(y) = z$:

$$z = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i z_i.$$

Коэффициенты описывающего полинома характеризуют степень влияния рассматриваемых факторов на функции отклика.

Существуют различные методы исследования и сравнения эффектов от влияния изменений рассматриваемых факторов. При классическом (традиционном) методе все факторы, кроме одного, остаются неизменными, их как бы «замораживают», варьируя последовательно в рассматриваемых пределах лишь один фактор. Подобный метод страдает рядом недостатков и даже может в отдельных случаях привести к ошибочным выводам. К наиболее существенным его недостаткам относят то, что при этом методе не удастся в полной мере выявить влияние взаимодействия факторов. Представим набор переменных $x_1, x_2, \dots, x_k$, соответствующих рассматриваемым факторам, в виде вектор-столбца:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_k \end{pmatrix}.$$

Пространство размерности k , в котором определен данный вектор $\mathbf{x}$, называется факторным пространством.

При экспериментальных исследованиях в условиях, соответствующих некоторому значению вектора $\mathbf{x}$, можно получить результаты наблюдений, в общем случае представляющие собой случайные величины, поэтому обычно говорят о функциональной зависимости среднего значения искомой характеристики от контролируемых переменных. Эта зависимость в общем виде может быть представлена так:

$$E(y/x) = \eta(x),$$

где $E(y/x)$ – среднее значение искомой величины y ; $\mathbf{x}$ – вектор-столбец, координаты которого – управляемые переменные, принадлежащие данному факторному пространству; $\eta(x)$ – функция отклика, зависящая от неизвестных параметров θ_i ($i = 1, 2, \dots, m$).

Поскольку вид функции отклика обычно выбирают исходя из априорных суждений и данных, уточнение функциональной зависимости сводится к определению неизвестных параметров θ_i . Чтобы определить параметры θ_i необходимо выбрать в данном факторном пространстве некоторую совокупность точек, пригодных для реализации эксперимента. Если при выборе точек осуществлять одновре-

менное варьирование несколькими переменными $(x_1, x_2, \dots, x_k)$, то результаты исследований будут получены с учетом эффекта взаимодействия факторов.

Таким образом, задача, связанная с получением наилучшего представления о влиянии выбранных переменных на функцию отклика, сводится к выбору оптимального в некотором смысле расположения точек в факторном пространстве. Очевидно, что при различном подходе к выбору расположения точек значения оценок θ_i могут отличаться друг от друга. Выбор наилучшего варианта эксперимента, приводящего к лучшим оценкам в смысле их близости к истинным значениям θ_i , можно основывать в классе линейных оценок на сравнении дисперсионных матриц $\mathbf{D}(\theta)$ или некоторых комбинаций из их элементов.

При нахождении оценок можно использовать функцию потерь, зависящую от затрат материальных средств и значений величин, характеризующих точность эксперимента. Если построить такую функцию потерь, то планирование эксперимента можно свести к поиску минимума этой функции. Конкретное решение этой задачи сопряжено со значительными трудностями. В литературе можно встретить A -, E -, G - и D -оптимальные планы, удовлетворяющие различным критериям. Так, A -оптимальный план минимизирует среднюю дисперсию оценок параметров, E -оптимальный план минимизирует большую ось эллипса рассеяния оценок параметров, G -оптимальный план обеспечивает минимум максимальной величины дисперсии значений функции отклика, D -оптимальный план минимизирует объем эллипсоида рассеяния оценок параметров. Наиболее проработанной считается задача построения D -оптимальных планов второго порядка. При достаточно большом числе учитываемых факторов с целью уменьшения числа экспериментов прибегают к построению планов второго порядка, близких к D -оптимальным планам.

Ротатабельный план обеспечивает одинаковую точность оценок параметров на равных удалениях во всех направлениях от центральной точки эксперимента. Если ковариационная матрица оценок параметров имеет вид $c\mathbf{I}$, где c – постоянная, а $\mathbf{I}$ – единичная матрица, то утверждается, что критерии оптимальности в смысле D, E, A совпадают. План, удовлетворяющий этим критериям, ортогональный и ротатабельный.

При ортогональных факторных планах каждый фактор варьировать симметрично относительно начала координат на двух уровнях. Это достигается принятием верхнего уровня за $(+1)$, а нижнего – за (-1) . При таком нормировании факторов обеспечиваются существенные упрощения последующих вычислений. Условие ортогональности, заключающееся в том, что сумма парных произведений соответствующих значений факторов должна быть равна нулю, имеет вид

$$x_{i_1} x_{j_1} + x_{i_2} x_{j_2} + \dots + x_{i_k} x_{j_k} = 0,$$

где x_{i_k} – и x_{j_k} – k -е нормированные значения факторов x_i и x_j соответственно; $i \neq j$ – условие линейной независимости параметров $x_1, x_2, \dots, x_k$.

Например, для двухфакторного плана с двумя уровнями варьирования:

$$(-1)(-1) + (-1)(+1) + (+1)(-1) + (+1)(+1) = 0.$$

Для составления ортогонального факторного плана необходимо рассмотреть все возможные неповторяющиеся комбинации из двух уровней рассматриваемых факторов. Число различных экспериментов N , определяемое числом всех неповторяющихся комбинаций, которые можно составить из k рассматриваемых независимых переменных, имеющих по два уровня, будет $N = 2^k$. При осуществлении всех 2^k возможных и неповторяющихся комбинаций получают полный факторный эксперимент. Например, в эксперименте с двумя факторами, варьируемыми на двух уровнях, число различных опытов $N = 4$ (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Опыт	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	y
1	+1	-1	-1	+1	y_1
2	+1	+1	-1	-1	y_2
3	+1	-1	+1	-1	y_3
4	+1	+1	+1	+1	y_4

Как видно из таблицы, в первом опыте результат экспериментального определения выхода y_1 получается при условии, что факторы x_1 и x_2 находятся на нижнем уровне.

Нормированные значения факторов должны удовлетворять двум условиям:

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} = 0; \quad \sum_{i=1}^N x_{ij}^2 = N, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad j = 1, 2, \dots, N.$$

Подобные ортогональные факторные планы обладают рядом отличительных свойств: при выполнении условий

$$x_{i_1} x_{j_1} + x_{i_2} x_{j_2} + \dots + x_{i_k} x_{j_k} = 0, \quad i \neq j;$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} = 0; \quad \sum_{i=1}^N x_{ij}^2 = N, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad j = 1, 2, \dots, N$$

коэффициенты уравнения регрессии получаются с минимальными и равными ошибками. Для вычисления указанных коэффициентов с помощью метода наименьших квадратов получаются наиболее простые формулы, при этом коэффициенты определяются независимо, что имеет существенное значение при переходе к более сложной форме уравнения связи (нет необходимости пересчитывать ранее полученные значения коэффициентов).

Матрица планирования для сочетаний различных уровней независимых переменных при $k = 3$ будет иметь более сложный вид (табл. 5.2). В таблице присутст-

вует дважды повторенная матрица для $k = 2$, первый раз для значений x_3 на нижнем уровне (-1) и второй раз – для значений x_3 на верхнем уровне $(+1)$. При $k > 3$ целесообразно воспользоваться готовыми схемами построения полных факторных экспериментов из матрицы $N = 2^k$.

Таблица 5.2

Опыт	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y_1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	y_7
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_3
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_4
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_5
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	y_6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_8

Существенный недостаток таких ортогональных планов – быстрый рост числа экспериментов с ростом числа факторов:

Число факторов k	2	3	4	5	6
Число экспериментов N	4	8	16	32	64

В случае, когда взаимодействия второго и выше порядков отсутствуют или малы, целесообразно реализовать матрицу планирования, содержащую лишь часть полного факторного эксперимента, т.е. провести дробный факторный эксперимент. Сущность применения этого эксперимента сводится к сокращению числа членов полинома за счет смешивания основных факторов с теми факторами, которые на основании априорных или интуитивных соображений слабо влияют на изучаемый процесс. Правильно выбранный дробный факторный эксперимент может существенно сократить число планируемых наблюдений. Рассмотрим уравнение регрессии для трех факторов

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3.$$

Очевидно, что при построении полного факторного эксперимента необходимо было бы предусмотреть проведение восьми опытов. Если же приравнять x_3 двойному взаимодействию x_1x_2 , то число опытов можно свести к четырем, что соответствует линейному уравнению регрессии

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$$

с матрицей планирования, представленной в табл. 5.3

Таблица 5.3

Опыт	x_0	x_1	x_2	x_3
1	+1	-1	-1	+1
2	+1	+1	-1	-1
3	+1	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1	+1

При этом, если подставить в уравнение регрессии значения $x_3 = x_1x_2$, а затем сгруппировать с учетом того, что $x_i^2 = 1$, то получим линейное уравнение регрессии, где каждый из найденных коэффициентов будет представлять сумму двух теоретических коэффициентов: $b_0 = \beta_0 + \beta_{123}$; $b_1 = \beta_1 + \beta_{23}$; $b_2 = \beta_2 + \beta_{13}$; $b_3 = \beta_3 + \beta_{12}$, т.е. коэффициенты β_i не удастся оценить отдельно. Подобное приравнивание отдельного фактора произведению других называется *генерирующим соотношением*.

Генерирующие соотношения можно составлять таким образом, чтобы в зависимости от наличия предварительных сведений получать полуреплики, сокращающие вдвое число опытов по сравнению с полным факторным экспериментом, или четвертьреплики, уменьшающие число опытов в четыре раза и т.д.

Факторный план в случае использования полинома второй степени строится уже при условии варьирования каждого фактора на большем числе решений. При применении центрального композиционного планирования к полному факторному эксперименту дополняют некоторое число точек, зависящее от числа рассматриваемых факторов.

Таким образом, для выбора условий испытаний необходимо, прежде всего, установить перечень факторов, значимо влияющих на величину искомого показателя, и определить диапазон их изменения. Из априорных соображений выбрать вид аппроксимирующего полинома, в соответствии с которым необходимо определить матрицу планирования для сочетаний различных уровней независимых переменных. Полученный факторный план даст полное представление о том, какими должны быть условия испытаний – будут получены необходимые данные о координатах точек факторного пространства, в которых надлежит провести эксперименты, требуемом числе опытов и порядке их реализации.

Основные понятия теории планирования эксперимента. Методологической основой экспериментальных исследований служит математическая теория планирования, базирующаяся на теории вероятностей и математической статистике. Предметом исследования этого научного направления служит эксперимент, в котором выделяются и изучаются некоторые общие черты независимо от того, в какой конкретно области знаний эксперимент проводится. В теории планирования выработана определенная система основополагающих понятий и терминов. Как правило любой объект исследования можно представить в виде схемы с определенным числом входов и выходов (рис. 5.3).

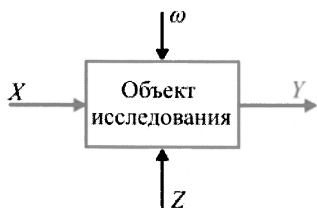


Рис. 5.3. Схема объекта исследования

Переменные, определяющие в своей совокупности состояние объекта, называют *факторами*. Множество факторов разделяют на три группы: контролируемые управляемые факторы $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)^T$, контролируемые неуправляемые факторы $z = (z_1, z_2, \dots, z_p)^T$, неконтролируемые возмущающие факторы $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_q)^T$. Выходные переменные объекта

называют откликами. Они в общем случае образуют вектор $y = (y_1, y_2, \dots, y_r)^T$. Зависимость отклика от факторов называется *функцией отклика*.

Эксперимент — это система операций, воздействий и наблюдений, направленных на получение информации об объекте исследования. Отдельной элементарной частью эксперимента является опыт.

Опыт — это воспроизведение исследуемого явления в определенных условиях проведения эксперимента при возможности регистрации его результатов.

Эксперимент характеризуется определенной направленностью и организованностью, устанавливаемых планом эксперимента.

План эксперимента — совокупность данных, определяющих число, условия и порядок реализации опытов.

Планирование эксперимента — процедура выбора плана эксперимента, удовлетворяющего заданным требованиям, т.е. выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью и достоверностью. Принято подразделять эксперимент на пассивный, активный и активно-пассивный.

Пассивный эксперимент — это эксперимент, при котором уровни факторов (фиксированные значения), в каждом опыте регистрируются исследователем, но не задаются.

Активным экспериментом называют эксперимент, в котором уровни факторов в каждом опыте задаются исследователем.

В *активно-пассивном эксперименте* наряду с программированием изменений управляемых факторов, регистрируются контролируемые неуправляемые факторы.

Эксперимент, реализуемый в виде серии опытов, в котором условия проведения каждой последующей серии определяются результатом предыдущих, называется *последовательным экспериментом*.

Совокупность всех возможных значений факторов образует факторное пространство, координатные оси которого соответствуют факторам. Размерность факторного пространства равна числу факторов k . Различают натуральные X_i и безразмерные x_i значения факторов. Преобразование натуральных значений факторов в безразмерные осуществляется с помощью операций нормализации факторов:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\Delta X_i}, \quad i = 1, 2, \dots, k,$$

где $X_{0i} = \frac{X_{i\min} + X_{i\max}}{2}$ – основной уровень фактора X_i ; $X_{i\min}, X_{i\max}$ – соответственно минимальное и максимальное натуральные значения фактора X_i ; $\Delta X_i = \frac{X_{i\max} - X_{i\min}}{2}$ – интервал варьирования фактора X_i в натуральных единицах. При изменении фактора X_i в пределах от $X_{i\min}$ до $X_{i\max}$ значение x_i изменяется в пределах от (-1) до $(+1)$.

Упорядоченная совокупность численных значений факторов, соответствующая условиям проведения опыта, рассматривается как точка факторного пространства, координатные оси которого соответствуют факторам.

Для активного эксперимента выделяют область планирования – область значений факторов x , в которой находятся точки, отвечающие условиям проведения опытов используемого плана эксперимента.

Эксперимент, целью которого является получение статистических данных, необходимых для определения оценок неизвестных параметров регрессивной модели или для оценивания значений неизвестной функции регрессии в некоторой области факторного пространства называется регрессионным.

План регрессионного эксперимента $\Pi(N)$ в соответствии с общим определением плана можно представить совокупностью точек $x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_N$, размещенных в заданной области планирования Ω_x , и соответствующих им чисел $m_1, m_2, \dots, m_j, \dots, m_N$ параллельных опытов в каждой из них:

$$\Pi(N) = \begin{pmatrix} x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_N \\ m_1, m_2, \dots, m_j, \dots, m_N \end{pmatrix}.$$

Параллельные опыты – это опыты, в которых уровни всех факторов сохраняются неизменными.

Совокупность всех различных точек $x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_N$ плана называется его спектром.

Стандартная форма записи условий проведения опытов задается матрицей плана, строки которой отвечают опытам, а столбцы факторам. Эта матрица может иметь совпадающие строки.

Матрица, составленная из всех строк матрицы плана, отличающихся уровнем хотя бы одного фактора, образует матрицу спектра плана.

Матрица дублирования – квадратная диагональная матрица, диагональные элементы которой равны числам параллельных опытов в соответствующих точках

спектра плана. План эксперимента может быть задан либо матрицей плана, либо матрицей спектра плана в совокупности с матрицей дублирования.

5.6. Применение сетевых методов планирования испытаний образцов ВВТ

С течением времени отношение к сетевым методам планирования и управления среди широкого круга различных специалистов менялось в большом диапазоне: от всеобщего увлечения сетевыми методами в первые годы до полного отрицания какой-либо их полезности в последующие годы. Но, как показывает практика, сетевые методы наиболее полно отвечают требованиям, предъявляемым к планированию и управлению работ при вводе в строй сложных систем. К сожалению, последняя функция систем сетевого планирования и управления (СПУ) все же недостаточно приспособлена к структуре и характеру различных ведомственных и производственных взаимосвязей, отчего эффективность ее не столь высока, как это следовало бы ожидать. Поэтому в настоящее время на практике сетевые методы планирования применяют для разработки технологической последовательности комплекса сложных производственных операций, проводимых при создании системы. При этом обычно используют хорошо апробированные на практике методические приемы и известную терминологию.

Сетевой график – это модель, отражающая всю последовательность и взаимосвязь работ, которые следует выполнить для достижения конечной цели. Основные элементы сетевого графика – работы и события. При применении сетевых методов для организации работ по вводу в строй сложных систем целесообразно использовать детерминированные сетевые графики. К детерминированным сетевым графикам относят сетевые модели, у которых перечень всех рассматриваемых работ не имеет неопределенностей и не носит случайного характера. Поэтому выполнение однозначной последовательности операций обязательно для достижения конечной цели.

В стохастических сетях отдельные работы или группы работ могут быть заданы с определенной вероятностью их выполнения и требуют учета переменной структуры сетевой модели с многовариантными способами достижения конечной цели.

Удобно назначать не три (оптимистическую, пессимистическую и наиболее вероятную), а одну временную оценку там, где существуют различного рода нормативные показатели, установленные на основании статистических данных. К назначению одной временной оценки прибегают и в случаях, когда заранее предопределен директивный срок и требуется мобилизация всех усилий на выполнение работ в минимально возможные сроки. Однако такой подход искажает основные принципы, на которых строится сетевой метод, так как директивные сроки могут оказаться далекими от реальности и не гарантируют принятие правильного решения. В большинстве же случаев необходимость применения одного временного параметра обусловлена новизной проводимых работ и отсутствием статистики по аналогичным системам для назначения экспертных оценок. Если при отсутствии достаточных опытных данных воспользоваться тремя временными оценками, то

разность между оптимистической или минимальной временной оценкой a или пессимистической и максимальной временной оценкой b может достигать недопустимо больших значений. Тогда, положив, что случайная величина, характеризующая продолжительность работ, подчиняется β -распределению, можно подсчитать значение дисперсии времени выполнения рассматриваемой работы:

$$\sigma_{ij}^2 = \left[\frac{b-a}{b} \right]^2.$$

Следовательно, чем больше разность между минимальной и максимальной временными оценками, тем больше дисперсия оценки сроков наступления событий и тем меньше точность прогнозирования момента окончания всех работ, поскольку дисперсия в последовательной цепочке работ накапливается.

Нужно отметить необходимость внедрения автоматизации при сборе, передаче и обработке информации, что обусловлено стремлением достичь высокой оперативности в принятии решений, особенно при значительной территориальной разбросанности элементов системы. Поскольку число участвующих организаций в процессе создания и испытаний сложных систем может достигнуть нескольких сотен, то общее число планируемых работ и событий доходит до десятков тысяч, а взаимно перекрещивающиеся связи между событиями бывают настолько запутаны, что при расчете параметров сети ручным способом трудно обойтись без ошибок (обработка сетевого графика вручную успешна лишь в случае, если объем сети не превышает 150–300 событий).

Для оперативного и безошибочного расчета сетевого графика процесса ввода в строй сложных систем требуется применение ЭВМ. Необходимость в ЭВМ обусловлена также особенностями, присущими процессу ввода в строй сложных систем: при настройке аппаратуры и испытаниях системы разработчик вносит различные конструктивные изменения, которые влекут за собой в большинстве случаев необходимость пересмотра сетевого графика в целом или в части отдельных групп работы. Изменения же, даже частичные, в сетевом графике требуют пересчета параметров сетевой модели и проведения исследований по выбору нового, наилучшего, варианта технологического цикла. Проведение подобной работы при ручном счете практически невозможно.

Для достижения успеха при автоматизации процесса обработки периодически обновляемой информации очень важно правильно выбрать принцип кодирования событий сетевого графика. Из опыта можно рекомендовать к использованию девяти- или семиразрядный код. Первые два разряда этих кодов можно выделить для нумерации подсистем, остальные разряды – для нумерации отдельных устройств и событий. Подобный принцип кодирования позволяет достаточно просто проводить корректировку сетевого графика при вынужденных изменениях технологического цикла, облегчает проведение обработки и способствует оперативному анализу параметров сетевой модели.

При вводе в строй сложных радиоэлектронных систем приходится иметь дело с сетевыми моделями большого объема. Разработка подобных графиков сопряжена с большой затратой труда, требует определенных навыков и умения. Чтобы избе-

жать ошибки и успешно провести разработку сетевых графиков, необходимо знать и соблюдать следующие основные правила.

1. Сетевой график – это ориентированный граф, состоящий из стрелок и кружков (прямоугольников). Стрелками изображают работы, под которыми могут пониматься как отдельные элементы технологического процесса, связанные с затратой времени, труда и материальных ресурсов, так и элементы, не требующие подобных затрат. В качестве работы может быть представлена также «фиктивная» работа – логическая связь и зависимость какой-то из работ от результатов другой. Каждая работа имеет предшествующее ей и последующее события. Событие отражает факт завершения как одной, так и нескольких работ и является необходимым условием для перехода к последующей работе. Последовательность работ в сети, в которой для каждой работы ее последующее событие совпадает с предшествующим событием следующей за ней работы, называется *путем*. Если требуется в соответствии с технологическим процессом выполнить между двумя событиями две или несколько работ, то недопустимо изображение их в виде параллельных (двойных, тройных и т. д.) стрелок. В этом случае целесообразно ввести дополнительные события и «фиктивные» работы. Следует тщательно следить за тем, чтобы для любого события нельзя было подобрать цепочку последовательных работ, представляющих собой замкнутый цикл, или петлю.

2. Сетевой график не должен иметь «тупиков» и «висящих» событий (исключение составляют начальное и конечное события). Конечное событие сетевого графика соответствует конечной цели, к которой стремятся; начальное событие не имеет предшествующих работ и событий. Конечное и начальное события не обязательно должны быть в единственном числе, но их перечень надо установить точно.

3. Важное значение при построении сетевого графика имеет правильный выбор уровня его детализации, определяемого характером операций технологического процесса. Поэтому целесообразно, чтобы каждая работа, отражаемая на сетевом графике, соответствовала технологически однородным операциям, выполнялась одним составом исполнителей и требовала затрат времени, примерно равного периоду обновления информации. На уровень детализации графика может также влиять необходимость отражения определенных связей и зависимостей между событиями. Необходимый уровень детализации при первоначальном составлении сетевого графика для вновь разрабатываемого технологического процесса возможно и не достигнут, но это не должно смущать исполнителей, так как со временем наступит определенная ясность и можно будет сделать требуемое уточнение.

4. Сетевые графики большого объема целесообразно разбивать на отдельные фрагменты, в результате чего их легче вычерчивать, размещать, анализировать; при определенных условиях улучшится также восприятие всего представляемого комплекса работ. Фрагменты следует выбирать в соответствии с определенными этапами и комплексами работ, которые присущи отдельным коллективам и имеют достаточно выраженную и характерную автономию. При этом очень внимательно надо отнестись к связям, отражающим взаимозависимость фрагментов; при выборе границ фрагментов следует обеспечить минимальное число разрываемых связей подобного рода.

5. Общий момент при разработке сетевых графиков и анализе параметров – определение и анализ работ, лежащих на критическом пути. Для каждого сетевого графика

$$t(L) = \sum t_{ij},$$

где $t(L)$ – длина пути, представляющая собой сумму продолжительностей t_{ij} всех работ, образующих данный путь.

Последовательность работ, лежащих на критическом пути, определяет наибольшую продолжительность выполнения во времени рассматриваемого процесса, т. е. всякое увеличение или уменьшение длины критического пути непосредственно приводит к увеличению или сокращению сроков выполнения всех работ из-за отсутствия резерва времени. Но кроме работ, лежащих непосредственно на критическом пути и составляющих примерно 10–15% от всех работ свободного сетевого графика, интерес представляют также работы, находящиеся на подкритических путях, которые хотя и обладают некоторым резервом времени, но настолько незначительным, что в любой момент при самых небольших срывах могут оказаться на критическом пути.

При анализе параметров сетевой модели решается задача улучшения технологического процесса, которая сводится к поиску путей уменьшения длины критического пути. Иногда это приводит к перераспределению «критичности», т.е. к переводу отдельных работ из ненапряженной области подкритических или критических работ.

6. НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

6.1. Задачи, решаемые при подготовке и проведении натурных испытаний образцов ВВТ

Натурные эксперименты, принципиально являясь наиболее достоверным источником информации о характеристиках сложных радиоэлектронных систем, позволяют решить все задачи исследований в приемлемые сроки и при допустимых материальных затратах.

Создание сложных образцов вооружения и военной техники (ВВТ) предполагают два больших этапа:

- 1) теоретические исследования;
- 2) практическая проверка полученных на первом этапе результатов.

Опытный образец сложной системы обычно создают в сокращенном варианте и используют для проверки функционирования отдельных типовых устройств, выполненных в соответствии с технической документацией, и оценки принятых новых конструктивных и технических решений. Натурные эксперименты на таком опытном образце используют одновременно в целях отработки математических моделей, предназначенных для всесторонней оценки испытываемой сложной системы. Такой подход характерен именно для сложных систем и имеет существенно важное значение, так как во многом предопределяет выбор условий испытаний и планирование числа натурных экспериментов. При натурных испытаниях опытных образцов сложной системы:

проверяют функционирование элементов, средств и устройств опытного образца;

проверяют принципы, заложенные в основу принятых технических решений, и правильность их конструктивного воплощения;

отрабатывают (калибруют) математические модели по результатам натурных испытаний;

получают характеристики испытываемых средств, представляющих дополнение к составу исходных данных, которые необходимы для оценки эффективности.

Решение этих задач сводится к организации и планированию натурных испытаний на опытном образце. Успех эксперимента во многом зависит от правильного учета различных факторов (порядка проведения работы для отработки функциони-

рования, квалификации специалистов, эксплуатационных характеристик создаваемой аппаратуры и т. д.).

Поскольку для этапа отработки на опытном образце характерна, как правило, недостаточно высокая эксплуатационная надежность аппаратуры, то большая часть времени, отведенного на организацию взаимодействия отдельных средств и устройств, тратится на устранение неисправностей. Чем сложнее система, тем больше времени требуется на стыковку ее отдельных узлов и устройств, а значит, тем больше будет вероятность возникновения неисправностей, на устранение которых затрачивается дополнительное время. Поэтому очень важно правильно определить состав средств, испытываемых на том или ином этапе, а также последовательность их наращивания. Последовательное наращивание функционально законченных устройств предопределяет число возможных промежуточных этапов, которые могут носить характер комплексных испытаний, проводимых с целью последовательной отработки взаимодействия между элементами системы, начиная с совместной работы нескольких функционально-законченных устройств и кончая всей системой.

План эксперимента должен предусматривать по возможности минимальные затраты времени. При разработке планов проведения экспериментов необходимо учитывать существующие ограничения на затраты материальных средств. Поэтому планирование и выбор необходимого числа натурных экспериментов с учетом достижения требуемой достоверности при определенных ограничениях на материальные затраты представляют собой одну из самых важных задач. Уяснив цели и задачи, которые следует решить при натурных испытаниях опытных образцов, необходимо наиболее полно отработать методики их проведения.

На этапе подготовки полезно затратить определенное время на изучение материалов и результатов аналогичных исследований, обращая особое внимание на приемы организации и методические положения, обеспечившие достижение успеха. Особое внимание следует обратить на анализ всех возможностей располагаемой материальной базы и ее соответствие требуемым условиям. Привлекаемые средства должны прежде всего обеспечить возможность регистрации результатов испытаний с необходимой точностью их измерений. Несовершенство принятых технических решений и недостатки в функционировании испытываемых объектов порой могут быть выявлены лишь при многократном повторении испытаний в одних и тех же условиях. Поэтому, организуя натурные испытания опытных образцов, следует учитывать необходимость обеспечения повторяемости одних и тех же условий.

Учитывая принцип последовательного наращивания числа испытываемых взаимодействующих средств и устройств, а также требования, связанные с выбором условий испытаний и необходимость обеспечения минимальных материальных и временных затрат, на практике обычно стремятся к выполнению такой последовательности этапов проведения натурных испытаний:

- автономные испытания отдельных элементов и подсистем;
- комплексные испытания подсистем;
- комплексные испытания системы (опытного образца) в целом.

На каждом из этих этапов приходится решать все перечисленные ранее задачи.

6.1.1. Оптимизация плана натурных испытаний образцов ВВТ

Обычно задачу планирования числа экспериментов по этапам испытаний стремятся решить на основе опыта с некоторым учетом выделенных материальных фондов. Такие планы не могут гарантировать достижение требуемой достоверности искомых оценок (в лучшем случае можно лишь ожидать более или менее благоприятного исхода), так как они не учитывают вероятности успешной реализации эксперимента, а это означает, что планируемое число экспериментов может оказаться недостаточным. Правильное решение задачи планирования натурных экспериментов должно обеспечить оптимальное распределение выделенных средств по этапам испытаний с учетом вероятности успешной реализации экспериментов и дать ответ на вопрос – достаточно ли выделено материальных средств для достижения требуемой достоверности искомых оценок.

Минимальное число экспериментов на каждом этапе для обеспечения заданной достоверности однозначно определяет требуемые материальные затраты в целом. Можно сформулировать и обратную задачу – обеспечить максимальную достоверность результатов испытаний на каждом этапе при условии реализации заранее заданной суммы ассигнований. При постановке задач планирования экспериментов можно использовать следующую модель испытательного процесса.

Пусть испытания некоторого опытного образца сложной системы проводят в n этапов. На каждом i -м этапе ($i = 1, 2, \dots, n$) необходимо найти оценки x_i^* параметра Θ_i , удовлетворяющие соотношениям $P(|\Theta_i - x_i^*| \leq a_i) = \alpha_i$, где α_i – вероятность попадания значений оценок x_i^* в заданный интервал $[\Theta_i \pm a_i]$.

Пусть для получения искомых оценок x_i^* на каждом этапе планируют s_i независимых экспериментов и для обработки результатов наблюдений x_{ij} ($j = 1, 2, \dots, s_i$) используют алгоритм

$$x_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{s_i} x_{ij}}{\sum_{j=1}^{s_i} \frac{1}{\sigma_{ij}^2}},$$

где σ_{ij}^2 – дисперсия x_{ij} .

Если на i -м этапе l -й эксперимент оказался по тем или иным причинам неудачным, то дисперсию σ_{il}^2 следует принять равной ∞ . Для всех удачных экспериментов дисперсия σ_{ij}^2 конечна и характеризует точность измерения величины параметра Θ_i в j -м эксперименте.

Принимая стоимость одного эксперимента на i -м этапе равной c_i , общие затраты на проведение n этапов испытаний можно выразить как $C = \sum_{i=1}^n c_i s_i$. С использованием рассмотренной выше модели испытательного процесса задачу планирования натуральных экспериментов можно сформулировать следующим образом.

Необходимо выбрать число экспериментов s_i на каждом i -м этапе таким образом, чтобы обеспечить максимум вероятности

$$\prod_{i=1}^n P(|\Theta_i - x_i^*| \leq a_i) = \max$$

при условии $\sum_{i=1}^n c_i s_i \leq C_0$, где C_0 – выделенные ассигнования на проведение испытаний опытного образца (за вычетом постоянных расходов, не зависящих от $s_1, \dots, s_n$).

Так как результаты наблюдений x_{ij} независимы, то вероятность $P(|\Theta_i - x_i^*| \leq a_i)$ можно выразить через функцию Лапласа:

$$P(|\Theta_i - x_i^*| \leq a_i) = \Phi(z_i = a_i \sqrt{\rho_i}),$$

где

$$\Phi(z_i) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{z_i} e^{-\frac{z^2}{2}} dz; \quad \rho_i = \sum_{j=1}^{s_i} \frac{1}{\sigma_{ij}^2}.$$

Для нахождения решений уравнений $\prod_{i=1}^n P(|\Theta_i - x_i^*| \leq a_i) = \max$ можно использовать метод динамического программирования.

6.1.2. Задача выбора числа экспериментов методом динамического программирования

Динамическое программирование применяется для оптимизации решений в случае, когда рассматриваются многошаговые или многоэтапные процессы. Выбор числа экспериментов на каждом этапе испытаний можно отнести именно к такого типа задачам.

Рассмотрим общую постановку задачи динамического программирования. Прежде всего, остановимся на критерии качества, характеризующем эффективность выбранного управления и успех операции в целом. Часто показатель эффективности W выбирают в виде аддитивной величины, представляющей сумму выигрышей (доходов) по всем этапам, т.е.

$$W = \sum_{i=1}^n W_i,$$

где W_i – выигрыш, достигаемый на i -м этапе; n – число этапов.

В данном случае необходимо обеспечить максимум вероятности (см. п. 6.1.1):

$$g = \prod_{i=1}^n P(|\Theta_i - x_i^*| \leq a_i) = \prod_{i=1}^n \alpha_i(s_i),$$

а это означает, что имеет место задача динамического программирования с мультипликативным критерием. Тогда основное функциональное уравнение имеет вид

$$g_i^* = \max_{s_i} \alpha_i(s_i) g_{i-1}^* (C_0 - c_i s_i),$$

где g_i^* – условный оптимальный выигрыш, получаемый на всех этапах от начала до i -го этапа включительно; $\alpha_i(s_i)$ – выигрыш на данном i -м шаге; g_{i-1}^* – условный оптимальный выигрыш на всех предыдущих этапах, включая $(i-1)$ -й этап; s_i – управляющая переменная – условное оптимальное управление на i -м этапе (число экспериментов); C_0 – ограничения в виде выделенных средств на проведение испытаний; c_i – стоимость одного эксперимента на i -м этапе.

С помощью приведенного уравнения можно найти именно то управление s_i , при котором достигается максимум выигрыша g_i^* , если известно значение выигрыша на предыдущем этапе g_{i-1}^* . Обычно процедура выбора оптимального управления состоит из двух частей.

Сначала на каждом этапе находится условное оптимальное управление и условный оптимальный выигрыш для всех этапов. Затем определяется безусловное оптимальное управление, оптимизирующее выигрыш в целом для всего процесса. Решение задачи обычно осуществляется последовательно в строго определенном порядке: при нахождении условного оптимального управления – от первого этапа к последнему, а при окончательной оптимизации – от последнего этапа к первому. Порядок вычисления можно изменить и на противоположный, когда условные оптимальные управления находятся последовательно от последнего этапа к первому этапу, а безусловные – от первого этапа к последнему этапу. Если привести схему вычислений условных оптимальных управлений от конца к началу, то она будет выглядеть следующим образом.

Сначала вычисляют оптимальное управление на последнем этапе, на котором расходуются все оставшиеся средства x , т.е. $s_n = \frac{x}{c_n}$ ($0 \leq x \leq C_0$). При этом будет достигнут выигрыш $\alpha_n(x)$. Затем, последовательно применяя основное функциональное уравнение, находят условные оптимальные уравнения $s_{n-1}(x), s_{n-2}(x), \dots, s_1(x)$ и соответствующие им значения выигрышей $g_{n-1}^*(x), g_{n-2}^*(x), \dots, g_1^*(x)$. После это-

го, используя данные об исходном состоянии системы, определяют безусловные оптимальные управления по цепочке:

$$s_1 \rightarrow x_1^* = C - c_1 s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow x_2^* = x_1^* - c_2 s_2 \rightarrow \dots \rightarrow x_{n-1}^* = x_{n-2}^* - C_{n-1} s_{n-1} \rightarrow s_n \rightarrow x_n^* = 0.$$

6.1.3. Задача оптимального распределения средств экспериментально-исследовательской базы

По определению $\alpha_i(s_i)$ – это вероятность того, что при заданном числе испытаний s_i оценка x_i^* параметра Θ_i находится в требуемых пределах относительно истинного значения. Для расчета значений $\alpha_i(s_i)$ методом Монте-Карло можно предложить следующий алгоритм.

1. С помощью датчика случайных чисел, равномерно распределенных в интервале $[0,1]$, получается случайное число ξ_j , которое сравнивается с заданной вероятностью P_i успешного исхода эксперимента. Если $\xi_j \leq P_i$, то принимается $\sigma_{ij} = \sigma_i$; если $\xi_j > P_i$, то принимается $\sigma_{ij} = \infty$.

2. Вычисляется $\rho_{ij} = \rho_{i(j-1)} + \frac{1}{\sigma_{ij}^2}$, где i и j – соответственно номера этапа испытаний и эксперимента. Смысл этой формулы сводится к следующему: j -й эксперимент либо уточняет информацию об измеряемом параметре, полученную по результатам $(j-1)$ -го эксперимента, либо не уточняет ее. В соответствии с этим к величине $\rho_{i(j-1)}$ либо добавляется второе слагаемое, либо не добавляется.

3. Находятся значения $z_{ij} = a_i \sqrt{\rho_{ij}}$,

$$y_{ij} = \Phi(z_{ij}) = \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \int_{-z_{ij}}^{z_{ij}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz,$$

где a_i – заданные величины.

4. Рассчитывается выборка $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{is_i}$.

5. Выражение $\alpha_i(s_i)$ получится в виде среднего арифметического, т.е.

$$\alpha_i(s_i) = (y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{is_i}) / s_i.$$

Рассмотрим алгоритм решения задачи оптимального распределения средств.

Эта задача заключается в том, чтобы найти $\max \prod_{i=1}^n \alpha_i(s_i)$ с учетом ограничений

$$\sum_{i=1}^n c_i s_i \leq x = C_0, \text{ где } n - \text{число этапов испытаний.}$$

Вместо решения одной задачи с данным числом ресурсов $x = C_0$ и фиксированным числом этапов рассмотрим семейство таких задач, в которых x может принимать любые положительные значения, а n и s_i – любые целые значения.

Пусть $g(x) = \prod_{i=1}^n \alpha_i(s_i)$. Построим таблицу значений

$$g_k^* = \max_{s_k} \alpha_k(s_k) g_{k-1}^*(x - C_k s_k),$$

где x принимает значения от 0 до заданной величины C_0 с шагом h , и таблицу значений $s_k(x)$, соответствующих $g_k^*(x)$.

Вычисления проведем по следующей схеме.

Весь ресурс назначим сначала на один этап и решим задачу: найти $\max g_1(x)$ при условии $s_1 C_1 \leq x$ с учетом ограничений $0 \leq x \leq C_0$. Составим таблицу, где найденный максимум $g_1^*(x)$ запишем в один столбец, а в следующий столбец поместим значение переменной, которое обеспечивает этот максимум. Данную процедуру повторим для всех значений x от $x=0$ до $x=C_0$ с шагом h . Далее число этапов увеличим на единицу и распределение имеющегося ресурса уже проведем в два этапа. В результате расчетная формула примет вид

$$g_2^* = \max_{s_2} \alpha_2(s_2) g_1^*(x - c_2 s_2),$$

где $c_2 s_2 \leq x$, $0 \leq x \leq C_0$.

Таблица 6.1

x	$g_1^*(x)$	$s_1(x)$	$g_2^*(x)$	$s_2(x)$
0	$g_1^*(0)$	$s_1(0)$	$g_2^*(0)$	$s_2(0)$
h	$g_1^*(h)$	$s_1(h)$	$g_2^*(h)$	$s_2(h)$
$2h$	$g_1^*(2h)$	$s_1(2h)$	$g_2^*(2h)$	$s_2(2h)$
...	...	...	...	...
kh	$g_1^*(kh)$	$s_1(kh)$	$g_2^*(kh)$	$s_2(kh)$
...	...	...	...	...
C_0	$g_1^*(C_0)$	$s_1(C_0)$	$g_2^*(C_0)$	$s_2(C_0)$

Значения $g_1^*(x - c_2 s_2)$ выбираем из первого столбца таблицы (для нетабличных значений можно произвести линейную интерполяцию). В результате решения $g_2^* = \max_{s_2} \alpha_2(s_2) g_1^*(x - c_2 s_2)$ запишем еще два столбца. Затем вновь увеличим число

этапов на единицу; заполним следующие два столбца таблицы и т.д. до конца (по числу этапов). Расчет проведем по рекуррентному соотношению

$$g_k^* = \max_{s_k} \alpha_k(s_k) g_{k-1}^*(x - C_k s_k).$$

Рассмотренный алгоритм решения задачи оптимального распределения средств по этапам испытаний естественным образом обобщается на многомерный случай, когда на каждом i -м этапе необходимо получать оценки векторного показателя Θ_i .

6.2. Испытания программных алгоритмов

При функционировании сложных автоматизированных систем реализуются управляющие воздействия, основанные на информационном взаимодействии как между отдельными элементами и подсистемами, так и между внешней средой и системой в целом. Функционирование сложной системы осуществляется в соответствии с алгоритмами, реализованными на ЭВМ в виде программ. Такие программы представляют собой последовательность команд. Для обычных, не очень сложных задач число команд в программе может колебаться от сотни до нескольких тысяч. В случае же сложных задач число команд может достигать сотен тысяч.

Однако программа характеризуется не только числом команд. Она может отличаться и очень сложной структурой, имеющей огромное число внутренних связей, отражающих взаимозависимость переменных и необходимость выполнения различных логических условий. Структура разрабатываемых в настоящее время программ для сложных автоматизированных систем имеет, как правило, блочно-модульное иерархическое построение. Подобное построение структуры программ влечет за собой увеличение числа команд, что отражается на повышении требований к объему памяти и производительности ЭВМ, а также на значительном увеличении и без того большого объема работ по программированию.

6.2.1. Особенности разработки программ большого масштаба

В настоящее время разработка математического обеспечения АСУ, включающего весь комплекс программ, реализующих методы и алгоритмы управления и информационного взаимодействия, составляет около 50–60 % трудоемкости всех работ по созданию и внедрению АСУ. Использование алгоритмических языков в целях автоматизации процесса программирования резко снижает затраты труда на разработку программ. Но тем не менее разработка программ большого масштаба продолжает оставаться сложной проблемой с силу следующих обстоятельств:

совершенствование АСУ (особенно в области управления технологическими процессами) неизменно приводит к усложнению систем управляющих алгоритмов, увеличению взаимосвязанности отдельных частей, блоков и модулей программы;

затраты времени на отдельные технологические операции при разработке программы распределяются следующим образом: разработка схем алгоритмов и программирования – 30–40%; автономная отладка отдельных блоков и модулей – 10–20%; комплексная отладка программы в целом, в том числе с реально дейст-

вующими объектами, – до 50%. Поэтому применение алгоритмических языков может облегчить решение задач лишь на первом этапе разработки программ.

Таким образом, существующая тенденция к усложнению алгоритмов управления и трудности комплексной отладки большой программы совместно с действующими объектами в реальном масштабе времени дают основание считать, что разработка программ большого масштаба, несмотря на достигнутые успехи в этой области, остается одной из самых трудоемких и сложных задач в процессе создания автоматизированных систем управления. Именно структурная сложность программы, длительность ее разработки, многочисленность привлекаемых специалистов, новизна решаемых задач, одновременность разработки программ с разработкой средств системы – все это, вместе взятое, представляет значительный источник ошибок, предопределяющих степень несовершенства и недостаточное качество созданной программы.

При разработке небольшой программы весь объем работы проводит один программист. Обычно он в состоянии в памяти воспроизвести структуру программы с указанием всех имеющихся логических элементов и условных переходов, а также восстановить полностью последовательность вычислительных процедур. Поэтому процесс отладки, выявления и устранения ошибок, внесения поправок и изменений носит эффективный характер. При создании больших программ отдельные части программы или подсистемы разрабатываются различными группами специалистов, поэтому взаимная увязка частей программы намного труднее, комплексная отладка требует значительных усилий и времени, в связи с этим число ошибок и неувязок растет, а их выявление становится затруднительным. Более того, для больших программ звучит достаточно веско мнение некоторых специалистов, которые считают, что программы никогда не бывают отлаженными до конца, поэтому сама мысль о том, что можно убедиться в отсутствии ошибок в какой-то программе, может быть поразительной. Именно сложность и масштабы больших программ приводят к качественно новому пониманию характера и источника ошибок, возможности их полного выявления.

По своему характеру ошибки могут быть самыми разнообразными. Прежде всего следует отметить ошибки, допускаемые программистами. Ни один программист, какой бы он высокой квалификацией ни обладал, не застрахован от ошибок при разработке программ. Ошибки кодировки, распределения оперативной и долговременной памяти и неправильного выбора схем вычислений, а также просчеты в оценке времени реализации и производительности ЭВМ – все это достаточно типичные и далеко не редкие ошибки, присущие программистам. Ошибки также могут зависеть от того, насколько правильно программист разработал схему машинного решения задачи, провел грамотное и рациональное дробление задачи на отдельные модули, определил структуру и содержание массивов, с которыми придется оперировать. Ошибки в программе могут появиться и в процессе ее фиксирования в памяти ЭВМ. К сожалению известно, что техническая документация, несмотря на многочисленные проверки, контроль и «считывания», также содержит большое число описок, искажений и пропусков. Принципиально важный характер имеют алгоритмические ошибки, связанные с неправильным или неполным учетом входных условий, диапа-

зонов измерения различных взаимосвязанных переменных, неправильным выбором критериев, аппроксимирующих зависимостей и т.д.

Последствия ошибок могут быть различными. Одни ошибки способны повлечь за собой полное прекращение функционирования системы, а другие – приводят лишь к ухудшению конечного результата. Однако важно не то, что в программе имеются ошибки, а то, что они могут остаться не выявленными в процессе отладки. Тогда оказывается, что надежда на хорошее функционирование АСУ с выработкой оптимальных решений представляет собой лишь беспочвенную иллюзию. Наличие скрытых и невыявленных ошибок в программе на самом деле свидетельствует о незнании существующих правил и внутренних закономерностей, которым подчиняется разработанная программа. В этом случае последствия ошибок в программе могут оказаться весьма тяжелыми. Например, нетрудно представить последствия ошибок в программе АСУ с технологическими процессами в металлургической или химической промышленности, в программах АСУ военного назначения, где ошибки способны привести к катастрофам и бедствиям, связанным с гибелью людей и необратимыми процессами. В связи с этим одной из важнейших задач становится задача поиска ошибок и оценки степени отлаженности программ. Без знания такой оценки вряд ли можно полностью и безоговорочно доверять рекомендациям и решениям, вырабатываемым с помощью АСУ.

Для поиска ошибок в процессе отладки применяют различные приемы. Наиболее совершенный метод – отладка с применением достаточно развитой системы отладки. Разработка такого рода обеспечивающей или вспомогательной системы увеличивает общую трудоемкость процесса создания АСУ и требует специалистов высокой квалификации, однако она оправдана, поскольку без нее в ряде случаев полная отладка больших программ практически невозможна. Подобная система отладки может включать в себя моделирование и интерпретацию команд, набор корректирующих программ, имитаторы внешних условий, сервисные программы и т.д.

Процесс отладки программ с выявлением и устранением допущенных ошибок по своему характеру и последствиям напоминает процесс выявления отказов в период «приработки» аппаратуры, поэтому для характеристики степени отлаженности программы можно, по-видимому, воспользоваться основными понятиями и определениями, заимствованными из теории надежности. Типичная кривая изменения интенсивности отказов во времени имеет три характерных участка (рис. 6.1). Участок I соответствует периоду «приработки» аппаратуры, когда выявляется наибольшее число отказов вследствие выхода из строя элементов со скрытыми дефектами или вследствие различных произ-

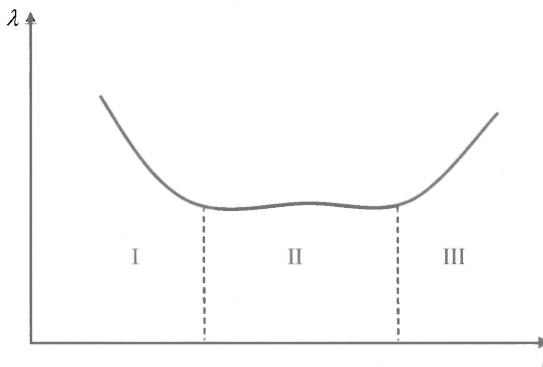


Рис. 6.1. Изменение интенсивности отказов во времени

водственных недостатков. На практике считают, что элементы в этот период отбраковываются за счет «выжигания». По мере выявления дефектных элементов и их замены интенсивность отказов будет снижаться. На участке II после окончания процесса приработки аппаратуры интенсивность отказов оказывается наименьшей и остается примерно постоянной в течение всего периода. Обычно этому участку соответствует режим нормальной эксплуатации аппарата. На участке III интенсивность отказов начинает расти вследствие проявления последствий износа деталей и их старения. Аналогичную картину можно наблюдать и при отладке программ. Действительно, в начальный период отладки программ идет интенсивный процесс выявления ошибок. По мере их выявления интенсивность падает, так как легко обнаруживаемые ошибки уже будут устранены, а трудно обнаруживаемые ошибки, соответствующие достаточно редкому сочетанию входных данных и маршрутов вычислений в программе будут с течением времени все больше проявляться как маловероятные события.

Поэтому интенсивность выявления ошибок в процессе отладки напоминает участок I (рис. 6.1), характеризующий период приработки аппаратуры. Если допустимо сравнение процесса отладки программ с периодом «выжигания», рассматриваемого в теории надежности, то участок II нормальной эксплуатации аппаратуры можно сравнивать с периодом эксплуатации разработанной программы после завершения определенной стадии отладки.

Для хорошо отлаженной программы большого масштаба вероятность обнаружения ошибки в период эксплуатации может не быть равной нулю вследствие присутствия таким программам особенностей. Но эта вероятность и не может быть большой. Выявление и устранение ошибок в такой программе относятся к редким событиям, а поэтому значение вероятности обнаружения ошибки на определенном периоде эксплуатации будет примерно постоянной величиной. Следовательно, и здесь можно констатировать картину, близкую к изменению интенсивности отказов аппаратуры на участке II.

В качестве количественной характеристики степени отлаженности программы можно принять вероятность того, что за заданный интервал времени в программе не произойдет ни одного отказа. Вероятностный характер выбранного показателя объясняется тем, что появление отказов в программе носит случайный характер. Действительно, сочетание разнообразных входных данных с конкретными значениями параметров и критериев условных переходов программ среди огромного множества вариантов определяет конкретный маршрут в структурной схеме вычислений. Если же учесть, что диапазон изменений входных данных, характер их изменений могут быть случайными, то очевидно, что выбор конкретного маршрута вычислений, а значит, и возможность обнаружения ошибки в программе (если таковая имеется) подчиняются случайной закономерности. Вместе с тем в больших программах из огромного множества различных маршрутов, составленных для соответствующих последовательностей команд, выполняющих ту или иную вычислительную процедуру, можно выделить наиболее часто и наиболее редко употребляемые варианты. Возможность существования в большой программе редко используемых вариантов последовательностей команд наряду с трудностями уста-

новления соответствующего этому варианту сочетания случайных входных воздействий дает основание считать, что в такой программе и после завершения определенного этапа отладки могут остаться неустранимые ошибки. Наличие в программе некоторого числа неустранимых ошибок может быть следствием не только трудности выбора сочетания случайных входных воздействий, приводящих к особым маршрутам вычислений. К таким же нежелательным последствиям приводят существенные ограничения во времени, отводимом для отладки, недоступность для анализа сложных взаимно переплетающихся связей и зависимостей между различными переменными, недостаточная квалификация разработчиков программ, использование примитивных приемов отладки и ряд других факторов.

Каждая попытка реализации программы в процессе отладки может привести к двум очевидным исходам: 1) реализация прошла успешно, и программа функционировала без сбоев и остановки; 2) попытка реализации закончилась безуспешно, и получен отрицательный результат. Таким образом, каждая реализация в процессе отладки в зависимости от полученного результата может быть отнесена к одному из двух состояний: z^+ – область реализаций с положительным исходом; z^- – область отрицательных исходов. Следовательно, процесс отладки характеризуется соотношением двух областей, соответствующих z^+ и z^- . Область отрицательных исходов существенно зависит от квалификации программистов, сложности реализуемой программы, длительности процесса отладки и ряда других условий. Каждая выявленная и устраненная ошибка в программе в общем случае должна приводить к уменьшению области отрицательных исходов. Исходя из этого, процесс отладки программы при определенных допущениях может быть сравним с моделью процесса «чистой гибели», известной из теории массового обслуживания. Граф состояний для процесса «чистой гибели» имеет вид, показанный на рис. 6.2. Используя

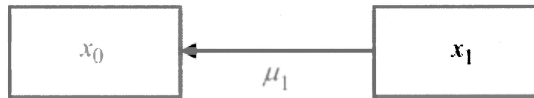


Рис. 6.2. Граф состояний процесса отладки программ

приведенную на рисунке схему, можно вычислить вероятность $p_1(t)$ того, что в момент t , соответствующий определенному этапу процесса отладки программы, ее реализация будет отнесена к области x_1 , т. е. $p_1(t) = e^{-\mu_1 t}$. Вероятность того, что в момент t , соответствующий определенному этапу отладки, реализация будет отнесена к области x_0 , можно получить из выражения $p_0(t) = 1 - e^{-\mu_1 t}$. Отсюда следует, что в первом приближении процесс изменения числа выявляемых ошибок в процессе отладки программы носит экспоненциальный характер.

Таким образом, структурная сложность больших программ, огромная трудоемкость процесса их разработки, трудности отладки и жесткие временные ограничения приводят к тому, что практически невозможно проверить все многочисленные маршруты вычислительных процедур при разнообразном сочетании входных данных. Как следствие этого, несмотря на завершение процесса отладки, существует определенная вероятность наличия ошибки в программе.

6.2.2. Организация и методы испытаний программно-реализованных алгоритмов

С целью уменьшения или исключения влияния последствий неустранимых ошибок в программе в настоящее время стремятся к созданию системы защиты, включающей различные меры контроля по значениям промежуточных данных, а иногда и по результатам повторных вычислений. Иерархическое и модульное построение программ наряду с облегчением процесса разработки, эксплуатации и внесения изменений должно также способствовать уменьшению влияния последствий неустранимых ошибок. Однако эффективность принимаемых мер защиты может быть различной в зависимости от особенностей программы, опыта специалистов, существующих возможностей и т.д. В связи с этим качество отлаженной программы будет тоже различным, поэтому программа должна быть подвергнута оценке, а это означает, что после отладки необходимо предусмотреть этап испытаний программно-реализованных алгоритмов. В зависимости от состава привлекаемых реальных средств и задач, подлежащих решению, испытания могут быть разделены на окончательные и предварительные.

Окончательные испытания включают в себя комплексные испытания программно-реализованных алгоритмов в динамике с участием и без участия реальных источников информации и реальных объектов управления. Их осуществляет, как правило, комиссия, составленная из компетентных специалистов. В результате работы комиссии должны быть даны оценки и получены ответы на сформулированные вопросы в целях испытаний.

Автономные испытания отдельных подпрограмм и блоков модулей предусматривают проверку соответствия содержимого запоминающих устройств ЭВМ описанию программно-реализованного алгоритма (алгоритма и текста программ), изложенному в технической документации; синтаксическую и семантическую проверки отдельных подпрограмм и блоков, направленные на отыскание ошибок, обусловленных несоответствием проверяемых программ системе формализованных правил их построения на данном ВК и неправильным использованием конструкции машинных команд и экстракодов; структурный контроль подпрограмм и блоков, предназначенный для выявления «тупиков», «повисших» участков, в которых отсутствует передача управления, факта «зацикливания» и возможных других нарушений в структуре программы; испытания подпрограмм и блоков с помощью имитаторов и тестов с целью проверки возможности решения задач, предусмотренных технической документацией (техническими условиями, заданием на программирование и техническими описаниями).

Для проверки соответствия содержимого запоминающих устройств ЭВМ техническому описанию производится вывод на печать и сличение результатов печати с текстом программ. При этом особое внимание уделяется проверке действительного состава модификаторов, рабочих ячеек и констант. В случае обнаружения несоответствия содержимого запоминающих устройств ЭВМ технической документации производится анализ причин несоответствия и принимаются меры по их устранению. Для обеспечения большей достоверности подобная проверка должна проводиться не менее чем двумя независимыми группами специалистов.

Синтаксическая и семантическая проверки проводятся с помощью специальной программы, входящей в состав общего математического обеспечения. Принцип ее работы основан на просмотре корректности записи очередных команд в проверяемой программе и их соответствии возможностям, заложенным в данный ВК. В ходе проверки выявлению подлежат: нарушения инструкции по программированию; наличие команд с нестандартными кодами операций и экстракодов с нестандартной рабочей информацией; наличие команд записи информации в индексные регистры. Все синтаксические и семантические ошибки устраняют до перехода к следующему этапу проверки.

Структурный контроль подпрограмм и блоков производится путем анализа схем испытываемых программ, построение которых в соответствии с общими требованиями должно быть предусмотрено в автоматическом режиме работы ВК. Принцип работы программы построения схем основан на поиске и выделении линейных участков (участков без команд управления) и команд управления (условных и безусловных переходов). При обнаружении «лишних» участков и «тупиков» эти места в программе маркируются специальным признаком. Выявленные структурным контролем ошибки должны быть устранены до перехода к следующей проверке.

При испытаниях подпрограмм и блоков с помощью имитаторов и тестов подбирается такой набор входных воздействий, который обеспечивает создание условий работы, близких к реальным. В этом случае варианты входных воздействий должны обеспечивать по возможности полную проверку всех основных траекторий и маршрутов вычислений при заданном диапазоне изменений входных данных. Проверка работоспособности программ для заданной области изменения входных данных не тождественна проверке путем простого перебора возможных маршрутов вычислений в программе, так как в общем случае одному и тому же маршруту могут соответствовать несколько наборов входных условий. Следовательно, составляя набор тестов, необходимо учитывать этот немаловажный момент.

С момента начала проведения проверок очень важно организовать систематический и полный сбор статистических материалов, характеризующих выявленные ошибки, затраты времени на их поиск и устранение, объем и характер доработок, принятые решения, даты внедрения исправлений и фамилии исполнителей. Полнота и детальность отображения процесса отладки и вносимых исправлений неприятны тем, что увеличивают трудоемкость работ; к тому же полная фиксация последовательно вносимых изменений в программу – достаточно объективная картина характера их работы. Но если оценить, насколько можно сократить время отладки и число допускаемых ошибок вследствие недоразумений между различными исполнителями, из-за пропусков, описок, забывчивости, повторений, отсутствия контроля, то трудно отрицать необходимость организации подобного документирования. Значение детальной и полной фиксации хода разработки и проверки программ особенно ощутимо, когда при длительной разработке в силу тех или иных причин происходит смена исполнителей.

При *предварительных испытаниях*, осуществляемых самими разработчиками программ, проводятся: автономные испытания отдельных подпрограмм, блоков

модулей; стыковочные испытания нескольких подпрограмм, завершающихся комплексными испытаниями программы, функционирующей без подключения реальных объектов; комплексные испытания всей программы совместно с реальными источниками информации и реальными объектами управления.

Комплексные испытания разработанной программы без подключения реальных управляемых объектов включают в себя: проверку комплектности технической документации; проверку соответствия программ, записанных на запоминающих устройствах ЭВМ, текстам программ конструкторской документации; оценку соответствия характеристик программ заданным значениям по техническим условиям и исходным данным на программирование (распределение и загруженность памяти ЭВМ, загруженность ЭВМ в различных режимах работы и др.); проверку реализации требований по иерархичности и модульности; оценку эффективности системы защиты от случайных сбоев, неустраненных ошибок в программе и помеховых искажений на входе; проверку работы системы автоматического контроля и поиска ошибок; проверку взаимодействия между собой отдельных частей программы с целью оценки правильности ее функционирования при решении всех задач, возложенных на систему (проверка осуществляется с помощью имитаторов средств и внешних источников информации при их работе в реальном масштабе времени); проверку взаимодействия всех реальных элементов системы и правильности их функционирования при решении всех задач, возложенных на систему и реализованных в программе.

Проверка комплектности осуществляется на основании заранее утвержденного перечня технической документации в соответствии с ГОСТом.

Проверка соответствия содержимого запоминающих устройств ЭВМ текстам программ, изложенным в конструкторской документации, производится путем сличения последней с информацией, выведенной на печать. При этом проверке подлежат связи между частями программы, возможные перекрытия программ при размещении в памяти, константы и свободные ячейки. Проверка проводится не менее чем двумя группами специалистов.

При оценке соответствия основных характеристик программ заданным значениям прежде всего определяется степень использования ВК по быстродействию и памяти. С этой целью применяют специально разработанные программы: воспроизведения; интерпретирующую, обеспечивающую анализ адресов памяти, используемых для программы; принимающую адреса памяти и обеспечивающую построение карт загрузки и их вывод на печать; снятия загрузки по быстродействию, снятия непрерываемых участков и вывод их на графики.

Для оценки реализации требований по иерархичности и модульности сперва проводится анализ программ с целью установления числа уровней иерархии, модульности построения программ на рассматриваемых уровнях, наличия перекрещивающихся связей между отдельными модулями на различных уровнях. Затем проверка осуществляется в ходе функционирования программ в различных режимах с применением имитаторов.

Представим схему программы в виде трехуровневой иерархической структуры (рис. 6.3). Для каждого блока нетрудно подсчитать коэффициент соотношения

команд α_{ij} , представляющий собой отношение числа команд, соответствующих данному блоку, к числу команд, содержащихся, например, в исходном блоке нулевого уровня:

$$\alpha_{ij} = \frac{k_{ij}}{k_0},$$

где α_{ij} – коэффициент соотношения команд для блока i -го уровня и j -го номера; k_{ij} – число команд, соответствующих данному блоку; k_0 – число команд, соответствующих начальному блоку.

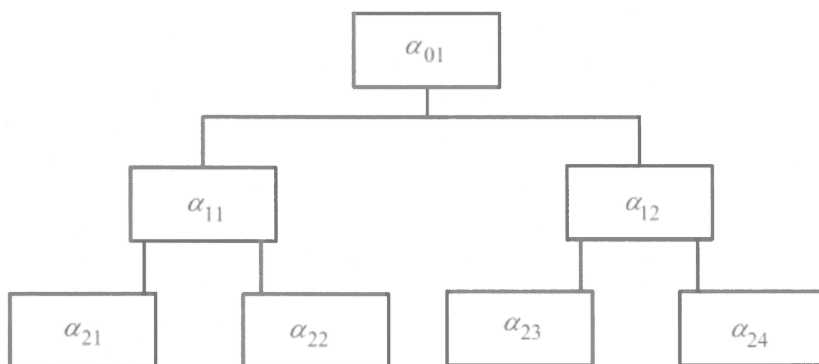


Рис. 6.3. Структура применяемых программ

Коэффициент α_{ij} дает относительную характеристику степени равномерности распределения всей задачи по блокам и самого распределения.

Небольшие значения коэффициентов α_{ij} свидетельствуют о преобладании принципа централизации, что непосредственно связано с увеличением объема перерабатываемой информации на верхних уровнях и неравномерностью загрузки вычислительных средств. Увеличение коэффициентов α_{ij} приводит, как правило, к увеличению объема информации, подлежащей обработке на нижних уровнях. Соответственно меняются объем и сложность подпрограмм и блоков на отдельных уровнях.

При проведении проверки функционирования программы в различных режимах с применением имитаторов и фиксации обнаруженных ошибок можно установить зависимость роста числа выявленных ошибок от величины коэффициента α_{ij} , т.е. можно установить зависимость ошибок от характера распределения (по объему и сложности) программы между ее отдельными блоками и подпрограммами. Резкое возрастание числа ошибок для крайних значений α_{ij} может служить косвенным свидетельством о неудачном разбиении структуры программы и необходимости внесения соответствующих корректировок. Одновременно с этой про-

веркой целесообразно осуществить проверку работы системы прерываний. При этом производится оценка правильности передачи управления предусматриваемым частям программы при различной последовательности их включения диспетчером, реализации принципа приоритетности и достаточности системы прерываний для обеспечения эксплуатации программы на различных режимах ее работы.

При необходимости для установления более полного представления о переключивающихся связях на различных уровнях можно осуществить проверку с вводом дополнительных прерываний связей между модулями. Оценка эффективности системы защиты от случайных сбоев, искажений входной информации и неустраненных ошибок в программе производится на основании собранных статистических данных за период отладки и испытаний программы.

При малом объеме статистических данных и их недостаточности, особенно по числу и характеру сбоев и ошибок, можно предусмотреть искусственный ввод ошибок в программу с фиксацией результатов функционирования системы защиты, обеспечивающей восстановление или исправление искаженной информации, а в отдельных случаях – отключение источников неправильной информации.

Эффективность системы защиты можно представить как отношение числа положительных результатов к общему числу возможных случаев срабатывания системы. Достигнутый уровень проработок в этом вопросе не позволяет в настоящее время предъявлять чрезмерно высокие требования к эффективности системы защиты, однако это не может служить оправданием для тех, кто мало или недостаточно уделяет внимания этому чрезвычайно важному по своим последствиям вопросу.

Одновременно с проверкой системы защиты следует проверить функционирование системы автоматического контроля и поиска ошибок при их искусственном вводе.

При проверке взаимодействия между собой отдельных частей программы с помощью имитаторов для оценки правильности ее функционирования внешние источники информации и объекты управления в системе заменяются математическими моделями или имитаторами. С помощью последних на вход ВК (с испытываемой программой) подается упорядоченная последовательность цифровых кодов, соответствующая тому или другому варианту условий испытаний. Положим, что испытываемая система имеет структуру, изображенную на рис. 6.4, где ЦПУ – центральный пункт управ-

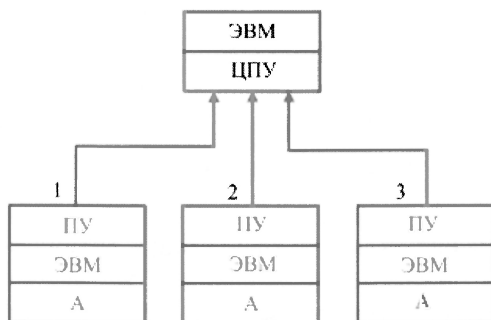


Рис. 6.4. Структура испытываемой системы

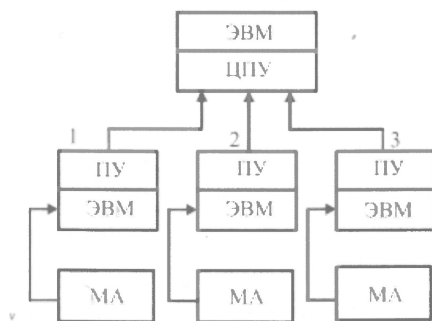


Рис. 6.5. Пример смоделированной системы

ления; А – аппаратура; ПУ – пункт управления. Тогда при проведении испытаний с применением имитирующих моделей создается комплексный моделирующий стенд (КМС), структурная схема которого для данного примера может выглядеть так, как показано на рис. 6.5, где МА – модель аппаратуры и входных условий.

Модели, имитирующие работу аппаратуры и реализующие входные условия, размещаются обычно или на резервных ЭВМ, находящихся на объектах управления (1, 2, 3), или же для них выделяются специальные дополнительные ЭВМ.

Для осуществления принципа последовательного наращивания сложности в процессе отладки и осуществления проверок может быть реализована и несколько иная схема комплексного моделирующего стенда (рис. 6.6, где ИМ-2 и ИМ-3 – имитирующая модель объектов 2, 3 соответственно). В данном случае, как и ранее, на объекте 1 (рис. 6.5) создается модель аппаратуры и входных условий, а вместо объектов 2 и 3 к центральной программе подключается имитирующая модель ИМ, воссоздающая «фон», в присутствии которого работает объект 1. Имитирующая модель обеспечивает реализацию и учет взаимовлияния в работе объектов и вместе с тем создаются достаточно простые условия для детальной отработки и проверки процесса управления объектом 1. Используемые при комплексных испытаниях модели должны быть откалиброваны по результатам натурных испытаний.

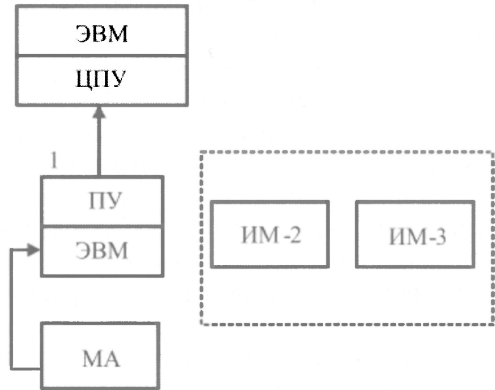


Рис. 6.6. Подсистема моделирования для испытаний

Одним из самых сложных вопросов при комплексных испытаниях является вопрос выбора и реализации условий испытаний. Варианты условий испытаний выбираются для каждого заданного типа внешней обстановки в соответствии с исходными данными на создание сложной автоматизированной системы. Каждый из вариантов будет отличаться особыми условиями, соответствующими какому-то определенному режиму работы системы.

Если входные воздействия представить в виде некоторого многомерного вектора, то каждый из вариантов может отличаться или же размерностью вектора, или же областью его задания. Как правило, на создаваемой сложной системе предусматривается работа на нескольких вполне определенных режимах, поэтому практически исключена какая-либо возможность произвола в выборе вариантов.

При создании условий в каждом из выбранных вариантов необходимо установить конкретные значения переменных из области их задания. Эти значения определяются, естественно, с учетом законов распределения. Но выбор и определение конкретных значений переменных должны быть подчинены решению основной задачи: поиску не выявленных ошибок в программе. В связи с этим целесообразно воспользоваться известными методами поиска для формирования входных условий

на каждую данную реализацию. Процедура поиска может осуществляться различными способами.

К наипростейшим, но далеко не самым легким по трудоемкости, можно отнести полный перебор всех возможных вариантов. Такой подход на практике неприемлем, так как в этом случае необходимо перебрать бесчисленное множество вариантов, что недопустимо ни с точки зрения затрат труда, ни с точки зрения затрат времени. При этом следует учесть следующую особенность. Перебрать и пересмотреть все возможное число маршрутов вычислений, присущих данной программе в какой-то мере еще можно, хотя сама по себе и эта задача не из легких, но подобный перебор не обеспечивает полного решения задачи по выявлению ошибок в программе, так как ошибки зависят не только от маршрута вычислений (один и тот же маршрут может соответствовать различному набору входных данных). Полный же перебор всех возможных сочетаний данных, представляющих многопараметрическую систему внешних условий, практически затруднен.

Можно воспользоваться способом итерационных процедур, применяемых при локальном поиске. Однако при этом поиск будет идти вдоль некоторых траекторий поиска и приведет лишь к нахождению локального экстремума. Можно попробовать градиентные методы, но к сожалению, они отличаются громоздкостью вычислительных процедур в случае большой размерности. Лучше всего применить схему случайного поиска, когда шаг выбирается случайным образом.

В многопараметрических задачах метод случайного поиска отличается повышенным быстродействием, помехоустойчивостью, простотой и надежностью. Рассмотрим более детально процесс выбора конкретных значений переменных, входящих в исходные данные.

Рассматриваемая система способна изменять свое состояние в зависимости от того или другого набора входных воздействий. Иными словами, при данной структуре программы с соответствующей совокупностью и функциональным содержанием операторов для каждого набора входных данных в результате обработки информации по конкретному маршруту можно получить вполне определенный результат. Представим переменные $x_1, x_2, \dots, x_n$, соответствующие конкретному набору входных воздействий, в виде вектора-столбца

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}.$$

Тогда множество различных сочетаний входных воздействий будет представлять собой множество n -мерных векторов: $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_k, \dots\}$, причем каждый n -мерный вектор $\mathbf{x}_k$ имеет область определения, заданную условиями задачи.

Каждому набору входных воздействий x_k при правильном функционировании системы можно поставить в соответствие вполне определенный результат z_k ,

представляющий реакцию системы. Следовательно, $Gx_k = z_k$ или $\Gamma: X \rightarrow Z$, т.е. каждому элементу $x_k \in X$ отображение Γ ставит в соответствие некоторое состояние $z_k \in Z$, являющееся образом элемента x_k .

Однако, в случае наличия ошибок в программе, несмотря на отлаженность аппаратуры и соответствие технических параметров требуемым значениям, выходной результат z_k обычно сравнивают с некоторой заданной областью предельно допустимых значений выходного результата, при которых еще возможно вести речь о выполнении системой своего предназначения. Область предельных значений может быть определена заранее из рассмотрения условий взаимосвязи выходного результата с характеристиками и параметрами системы и выходных данных.

Таким образом, если при задании различных входных условий из области их определения величина z_k окажется в пределах диапазона, ограниченного крайними значениями $z_{\min} \leq z_k \leq z_{k \max}^*$, то исход эксперимента будет положительным (z^+), в противном случае – отрицательным (z^-). Тогда задача выбора условий испытаний при комплексных проверках программы сводится к поиску и выделению из множества X всех тех сочетаний входных условий, которые приводят к выявлению ошибок в программе и уменьшению области отрицательных исходов (z^-) или, иначе, к максимизации вероятности правильного функционирования программы, представляющей показатель качества.

6.2.3. Методика сбора и обработки данных при испытаниях программ

Вся информация по результатам отладки и испытаний программы фиксируется в аппаратных журналах и на регистрирующих устройствах ВК и аппаратуры документирования. Форма сбора статистического материала в аппаратном журнале может быть рекомендована в следующем виде:

Дата, время начала и конца работы	Этапы испытаний	Участие реальных объектов	Результат реализации при испытаниях	Время появления ошибки, режим работы программы	Характер появления ошибки	Выявленные причины, время поиска и устранения ошибки	Принятые меры и результаты устранения	Дата устранения, фамилия исполнителя	Способ проверки после устранения ошибки, дата проверки, фамилия проверяющего	Входит ли в зачет результат для оценки характеристик программы

На основании всей собранной статистической информации проводится предварительная обработка, по результатам которой заполняется таблица:

Группа реализаций	Суммарное число реализаций n_k	Число положительных реализаций s_k

Результаты, собранные в этой таблице, дают достаточно полное представление о характере и особенностях протекания процесса отладки программ.

Для данных условий (степени сложности программы, уровня квалификации программистов, длительности отладки и т.д.) развитие и протекание процесса отладки во времени подчиняются некоторой вполне определенной закономерности, которую можно выявить, если провести выравнивание полученного ряда наблюдений. Выравнивание обычно состоит из: подбора типа кривой, форма которой соответствует характеру изменения данного ряда наблюдений; определения численных значений параметров выбранной кривой. Полученная таким образом кривая позволяет не только описать исследуемый процесс по результатам наблюдений в прошлом, но и дает возможность осуществить прогнозирование развития исследуемого процесса в последующие моменты времени.

На практике для выравнивания экспериментальных данных применяют достаточно простые функции в виде полиномов различной степени, экспонент или логических кривых. Выбор вида функции, прежде всего, должен быть основан на анализе характера изменений исследуемого ряда наблюдений и самого процесса по существу, хотя можно воспользоваться и рекомендациями, основанными на анализе поведения ряда формальных показателей. Так, например, для выбора модифицированной экспоненты достаточно убедиться в линейном характере изменения показателя $\log u_t$, представляющего собой логарифм среднего прироста, или в непрерывном уменьшении с постоянным темпом первых разностей уровней рассматриваемого ряда. Как показывают результаты проведенных исследований, при подборе кривой для описания процесса отладки программ наблюдается именно такой характер поведения указанных показателей. При выборе конкретного вида указанной зависимости воспользуемся «моделью роста», применяемой в теории надежности,

$$P_k = P_\infty - \frac{\alpha}{k},$$

где P_k – вероятность правильного функционирования программы во время k -го цикла испытаний; P_∞ – установившееся значение вероятности правильного функционирования программы, достижимое при $k \rightarrow \infty$; α – коэффициент, характеризующий скорость роста; k – номер цикла.

Применение подобной модели роста вероятности правильного функционирования программы строится на двух предположениях:

1) установившееся значение вероятности при длительном процессе выявления ошибок будет близко к единице;

2) по истечении некоторого времени достигается точка практического «прекращения роста» кривой вероятности.

Для получения искомой оценки необходимо по результатам, сведенным в последнюю таблицу, определить значения P_∞ и α . Подбор параметров по статистическим данным на основании известной функциональной зависимости относится к

типу регрессионных задач. Оценку искомых параметров можно получить с помощью метода наименьших квадратов или метода максимального правдоподобия.

Для получения оценок по методу наименьших квадратов минимизируем сумму квадратов Q отклонений результатов наблюдений от значений, описываемых предлагаемой моделью, для чего найдем частные производные по искомым параметрам и решим два уравнения относительно этих параметров:

$$Q = \sum_{k=1}^N \left(\frac{s_k}{n_k} - P_{\infty} + \frac{\alpha}{k} \right)^2 = \min;$$

$$\frac{\partial Q}{\partial P_{\infty}} = -2 \sum_{k=1}^N \left(\frac{s_k}{n_k} - P_{\infty} + \frac{\alpha}{k} \right) = 0;$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \alpha} = 2 \sum_{k=1}^N \left(\frac{s_k}{n_k} - P_{\infty} + \frac{\alpha}{k} \right) \frac{1}{k} = 0.$$

Отсюда

$$P_{\infty} = \frac{c_2 \sum_{k=1}^N \frac{s_k}{n_k} - c_1 \sum_{k=1}^N \frac{s_k}{kn_k}}{Nc_2 - c_1^2};$$

$$\alpha = \frac{c_1 \sum_{k=1}^N \frac{s_k}{n_k} - N \sum_{k=1}^N \frac{s_k}{kn_k}}{Nc_2 - c_1^2},$$

где $c_1 = \sum_{k=1}^N \frac{1}{k}$; $c_2 = \sum_{k=1}^N \frac{1}{k^2}$.

При применении метода максимального правдоподобия значения параметров определяются из уравнения правдоподобия.

Функция правдоподобия для k -го этапа будет иметь вид

$$L_k = \text{const } P_k^{s_k} (1 - P_k)^{(n_k - s_k)}.$$

Тогда

$$L = \prod_{k=1}^N L_k = \text{const } \prod_{k=1}^N P_k^{s_k} (1 - P_k)^{(n_k - s_k)}.$$

Прологарифмируем данное выражение:

$$\log L = \log \text{const} + \sum_{k=1}^N s_k \log \left(P_{\infty} - \frac{\alpha}{k} \right) + \sum_{k=1}^N (n_k - s_k) \log \left(1 - P_{\infty} + \frac{\alpha}{k} \right).$$

Уравнения правдоподобия примут вид

$$\frac{\partial \log L}{\partial P_{\infty}} = \sum_{k=1}^N \frac{s_k}{P_{\infty} - \frac{\alpha}{k}} - \sum_{k=1}^N \frac{n_k - s_k}{1 - P_{\infty} + \frac{\alpha}{k}} = 0;$$

$$\frac{\partial \log L}{\partial \alpha} = - \sum_{k=1}^N \frac{s_k / k}{P_{\infty} - \frac{\alpha}{k}} + \sum_{k=1}^N \frac{(n_k - s_k) / k}{1 - P_{\infty} + \frac{\alpha}{k}} = 0.$$

Совместное решение полученных уравнений возможно лишь методом проб и ошибок. При некоторых небольших упрощениях и допущениях можно получить следующие выражения для искомых оценок:

$$\alpha = \frac{\left\{ \sum_{k=1}^N k s_k - \frac{N+1}{2} \sum_{k=1}^N s_k \right\} / n}{\left[(N+1)/2 \right] c_1 - N};$$

$$P_{\infty} = \frac{\left[(c_1/N) \sum_{k=1}^N k s_k - \sum_{k=1}^N s_k \right] / n}{\left[(N+1)/2 \right] c_1 - N},$$

где $n = (1/N) \sum_{k=1}^N n_k$; $c_1 = \sum_{k=1}^N 1/k \approx \log(N+0,5) + E$; E – постоянная Эйлера, равная 0,577215... . Используя вторые частные производные, можно найти величину дисперсии $D(\hat{P}_k)$ и соответствующие доверительные интервалы.

Таким образом, подобранная «кривая роста» описывает процесс выявления и устранения ошибок в программе. С помощью этой кривой можно не только оценить степень отлаженности программы в настоящий момент, но и осуществить прогнозирование развития процесса в будущем.

7. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТРАЕКТОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

7.1. Системы координат, используемые при траекторных измерениях

При траекторных измерениях в качестве объектов измерений могут быть выбраны объекты различного целевого назначения, действующие в широком диапазоне дальности и высот (от малых до космических).

Вычисления координат траекторий этих объектов может производиться как по результатам измерений с одного пункта, так и по данным нескольких измерительных пунктов, расположенных на значительных расстояниях друг от друга. В последнем случае необходимо учитывать формы и размеры Земли и производить пересчет из местных систем координат в какую-то общую систему. Кроме того, при измерениях параметров космических аппаратов, действующих на значительном удалении от Земли, необходима привязка не только к геодезическим пунктам Земли, но и к определенным астрономическим пунктам, так как Земля совершает сложное движение относительно других планет и звезд. В связи с этим в практике внешнетраекторных измерений используются различные системы координат при решении тех или иных частных и общих задач, а при обработке широко пользуются пересчетом из одной системы координат в другую.

Как известно, поверхность Земли имеет неправильную форму. Следовательно, вычисление координат траектории по данным средств, расположенных на поверхности Земли, вызывает определенные трудности. Для удобства расчетов в геодезии физическая фигура Земли заменяется приближенной математической фигурой.

В качестве основной поверхности Земли условно принята поверхность мирового океана в состоянии полного равновесия содержащихся в нем водных масс. Продолжая мысленно эту поверхность в сторону суши таким образом, чтобы она всюду пересекала отвесные линии под прямым углом, получим замкнутую уровненную поверхность Земли. Геометрическое тело, ограниченное этой поверхностью, называется *геоидом*. В результате проведения больших измерительных работ и теоретических исследований по ряду смежных с геодезией наук установлено, что поверхность геоида наиболее близко подходит к сравнительно простой математической поверхности эллипсоида вращения с малым сжатием. Эта фигура называется *сфероидом*.

Основными элементами сфероида, определяющими его геометрические размеры, являются полуоси: a – большая или экваториальная и b – малая или полярная (рис. 7.1).

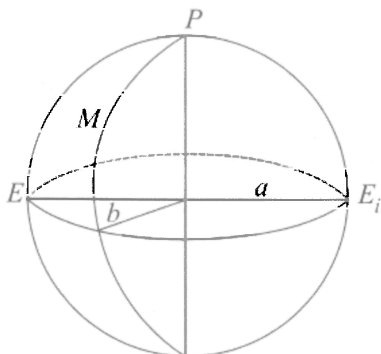


Рис. 7.1. Графическое представление земной поверхности

Для решения многих практических задач в качестве параметров сфероида используются также величины сжатия α и эксцентриситета e^2 :

$$\alpha = \frac{a-b}{a}; e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}. \quad (7.1)$$

Плоскость, проведенная через большую ось перпендикулярно малой оси, называется *экваториальной*, а плоскость, проведенная через малую ось и любую точку на поверхности сфероида, – *меридианной*. При точных вычислениях всегда исходят из представления Земли, как эллипсоида вращения, предварительно проектируя

на его поверхность все измеренные геодезические величины и пункты, определяемые на реальной поверхности Земли. Эллипсоид, определенным образом ориентированный в теле Земли, на поверхность которого проектируют результаты измерения геодезических пунктов, называют *референц-эллипсоидом*. Основные требования, которым должен удовлетворять этот эллипсоид:

- центр тяжести эллипсоида совпадает с центром тяжести геоида;
- объем эллипсоида равен объему геоида;
- плоскости экватора эллипсоида и геоида совпадают;
- сумма квадратов отклонений геоида от эллипсоида минимальная.

Задача определения формы и размеров земного эллипсоида является серьезной проблемой изучения Земли и решается при совместном использовании данных геодезии, астрономии, гравиметрии, геологии, геофизики и других смежных наук.

В качестве референц-эллипсоида был принят эллипсоид с параметрами: $a = 6378245\text{ м}$; $b = 6356863,02\text{ м}$; $\alpha = 1:298,3$. Он назван эллипсоидом Красовского в честь советского ученого, внесшего в изучение этого вопроса основной вклад. В некоторых странах пользуются эллипсоидами Хейфорда, Бесселя, Кларка, основанных на измерениях, приведенных на территориях этих стран.

Астрономо-геодезические, гравиметрические работы, выполненные в последнее время, и результаты наблюдения за искусственными спутниками подтвердили выводы Красовского.

7.1.1. Геодезические системы координат

Для определения положения точки на земной поверхности в геодезии принята поверхностная «географическая» (или «геодезическая») система координат, по которой положение точки на поверхности характеризуется двумя координатами: долготой L и широтой B (рис. 7.2).

Геодезической долготой называется двугранный угол между плоскостями начального меридиана и меридиана, проходящего через данную точку. Начальный (Гринвичский) меридиан – это линия пересечения эллипсоида и плоскости, проходящей через малую полуось Гринвичской обсерватории.

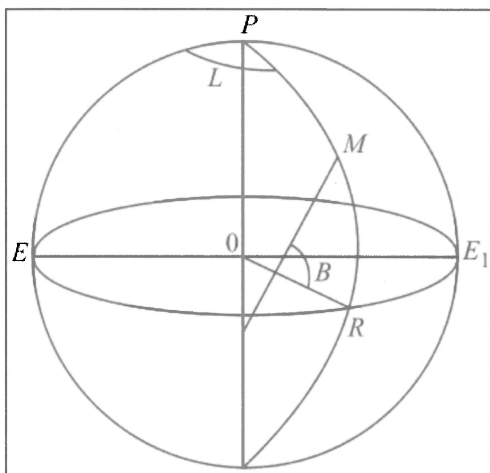


Рис. 7.2. Геодезические системы координат

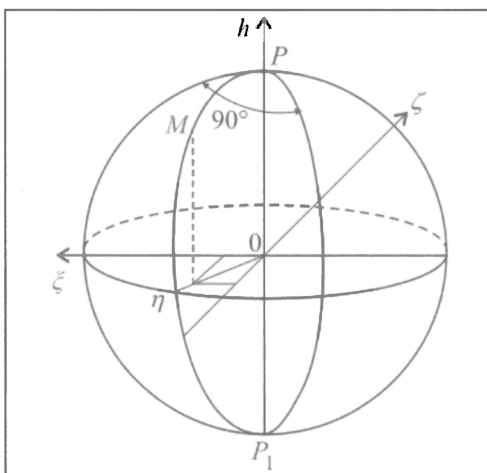


Рис. 7.3. Взаимосвязь геодезической и центральной систем координат

Геодезической широтой называется острый угол между плоскостью экватора и нормалью к поверхности эллипсоида в данной точке. Широты точек, расположенных в северном полушарии, называются северными. Широты точек южного полушария – южными. Аналогично долготы точек к востоку от начального меридиана называются восточными, а к западу – западными. В Советском Союзе, если речь идет о территории СССР, слова *северная* для широты и *восточная* для долготы опускаются.

Геодезические координаты L и B определяют либо по карте, либо путем привязки к триангуляционным пунктам, координаты которых известны с большой точностью, либо по звездам. В дальнейшем при изложении вопросов измерений мы будем считать их известными.

В тех случаях, когда необходима привязка точек, находящихся во внешнем пространстве Земли, использование поверхностной системы координат неудобно и пользуются центральной прямоугольной пространственной системой координат ξ, ζ, η (рис. 7.3). В этой системе за начало координат принимается центр эллипсоида. Ось 0η располагается по полярной оси эллипсоида, ось 0ζ образуется пересечением плоскости меридиана Гринвича и плоскости экватора, ось 0ξ дополняет систему до правой.

Найдем взаимосвязь между геодезической и центральной системами координат. В качестве вспомогательных переходных систем координат рассмотрим систему прямоугольных линейных координат x, y и систему координат с приведенной широтой U и географической долготой L и на их основе найдем некоторые соотношения, определяющие взаимосвязь между системами координат.

Система прямоугольных линейных координат относится к плоскости меридиана данной точки. Если выделить меридианную плоскость, проходящую через данную точку M (рис. 7.4), то ее положение может быть определено с помощью координат x и y , связанных в этой системе уравнением эллипса:

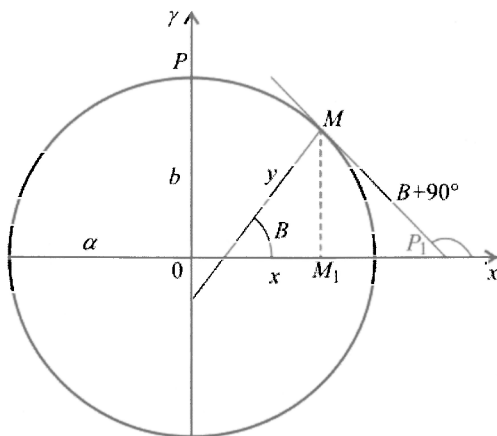


Рис. 7.4. Приведенные широта и долгота

откуда

$$-\frac{dy}{dx} = -\frac{b^2}{a^2} \frac{x}{y} = \operatorname{tg}(B + 90^\circ) = \operatorname{ctg} B,$$

следовательно,

$$\operatorname{tg} B = \frac{a^2}{b^2} \frac{y}{x}. \quad (7.2)$$

Выразив в выражении (7.2) y через x и $\operatorname{tg} B$ и подставив в уравнение эллипса, после преобразований получим обратную зависимость:

$$x = \frac{a \cos B}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}. \quad (7.3)$$

Аналогично найдем

$$y = \frac{a(1 - e^2) \sin B}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}. \quad (7.4)$$

Выражения (7.2), (7.3) и (7.4) связывают координаты x и y с геодезической широтой B .

Система координат с приведенной широтой U и долготой L так же, как и предыдущая система координат, удобна для приведения различных преобразований в меридианной плоскости. Одной из координат этой системы является известная уже геодезическая долгота L . Что же касается второй координаты – приведенной широты – то она требует некоторого пояснения.

Рассмотрим меридианную плоскость, проходящую через данную точку M , находящуюся на поверхности эллипсоида (рис. 7.5). Радиусом, равным большой полуоси эллипса a , проведем окружность пунктирной линией. Продолжим ординату

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

Из аналитической геометрии известно, что тангенс угла, образованного касательной в данной точке с положительным направлением оси абсцисс, равен производной, записанной в виде

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg}(B + 90^\circ).$$

Дифференцируя уравнение эллипса, находим

$$\frac{2x}{a^2} + \frac{2y}{b^2} \frac{dy}{dx} = 0,$$

MM_1 до пересечения с окружностью. Пусть она пересечет ее в точке m . Угол U между направлением из центра эллипса на точку m и осью x и будет приведенной широтой.

Имеем

$$x = a \cos U.$$

Подставив значения x в уравнения эллипса, получим

$$y = b \sin U.$$

Таким образом, получили выражения, связывающие приведенную широту с прямоугольными координатами x и y :

$$x = a \cos U, \quad y = b \sin U. \quad (7.5)$$

Подставив полученные значения x и y в выражения (2.3), (2.4), получим

$$\sin U = \frac{\sqrt{1 - e^2 \sin B}}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}; \quad (7.6)$$

$$\cos U = \frac{\cos B}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}.$$

Теперь найдем связь между центральной и геодезической системами координат. Для этого выразим сначала ξ , ζ , η точки M через приведенную широту U и долготу L . Из рис. 7.6 видим, что

$$\begin{aligned} \eta &= y = b \sin U; \\ \xi &= x \cos L = a \cos U \cos L; \\ \zeta &= x \sin L = a \cos U \sin L. \end{aligned} \quad (7.7)$$

Подставив значения $\cos U$ и $\sin U$ из выражений (2.6), получим

$$\begin{aligned} \xi &= N \cos B \cos L; \\ \zeta &= N \cos B \sin L; \\ \eta &= N(1 - e^2) \sin B, \end{aligned} \quad (7.8)$$

где

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}. \quad (7.9)$$

Можем показать, что N есть длина нормали от точки M до пересечения с осью η .

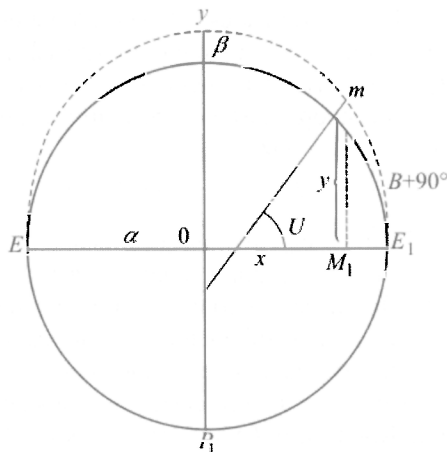


Рис. 7.5. Расчет меридианной плоскости

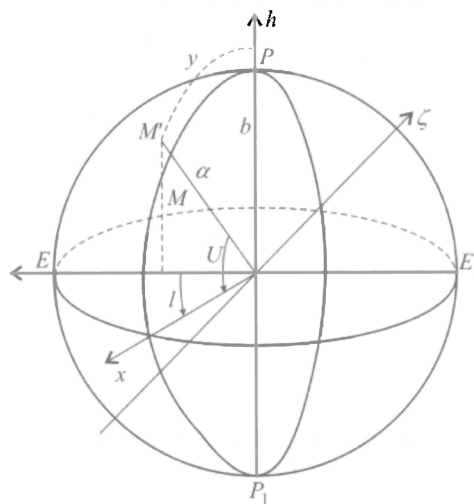


Рис. 7.6. Взаимосвязь центральной и геодезической систем координат

Присутствие в формулах длины нормали N дает возможность легко учесть реальное превышение точки M над сфероидом Красовского (над уровнем моря) H . Очевидно, что если увеличим длину нормали на высоту H , то тем самым получим значение координат центральной системы с учетом превышения данного пункта над уровнем моря:

$$\xi = (N + H) \cos B \cos L; \zeta = (N + H) \cos B \sin L; \eta = [(1 - e^2)N + H] \sin B. \quad (7.10)$$

При измерениях на небольших участках земной поверхности применение геодезических координат может оказаться неоправданным из-за значительной сложности. Выигрыш в точности по сравнению с более простой плоской системой координат, получающейся путем проекции поверхности сфероида с нанесенными на ней пунктами на плоскую поверхность, незначителен.

Метод проекции сферы на плоскость разработан Гауссом и уточнен для сфероида Крюгером. Сущность проекции Гаусса – Крюгера заключается в том, что эллипсоид вращения пересекается по меридианам на шестиградусные зоны (рис. 7.7). Эти зоны в свою очередь проецируются на поверхность цилиндра, касающегося

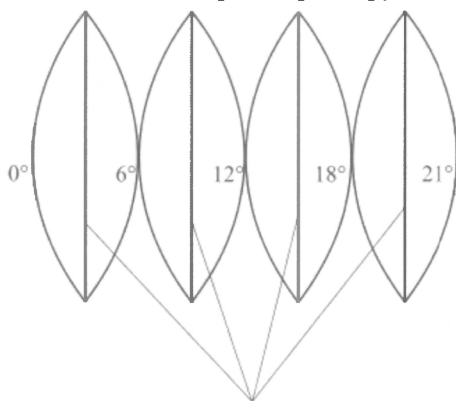


Рис. 7.7. Принцип построения системы Гаусса–Крюгера

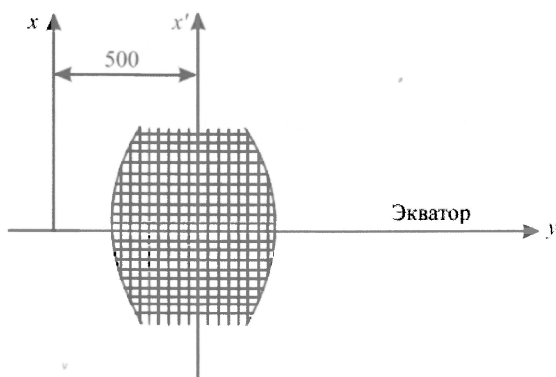


Рис. 7.8. Гауссовские углы сближения

земного шара по среднему (осевому) меридиану зоны. Крайние меридианы зоны образуют после проекции боковые стороны трапеций карты масштаба 1: 1000000. Следовательно, каждая зона включает в себе соответствующую колонку трапеций карты этого масштаба.

При построении зоны в проекции Гаусса–Крюгера вместо географической сетки (по широтам и меридианам) на проецируемой поверхности строят прямоугольную сетку координат, которые также называются координатами Гаусса–Крюгера (рис. 7.8). Начало гауссовской системы координат находится на экваторе и смещено относительно осевого меридиана зоны на 500 км, чтобы избежать отрицательных значений координат.

При использовании плоских прямоугольных координат для уменьшения ошибок необходимо учитывать Гауссовский угол сближения γ между меридианом и осью ординат (рис. 7.9).

При ориентировании на местности с помощью плоских прямоугольных координат пользуются понятием дирекционного угла φ , т.е. угла между направлением из точки стояния на искомую точку и осью ординат.

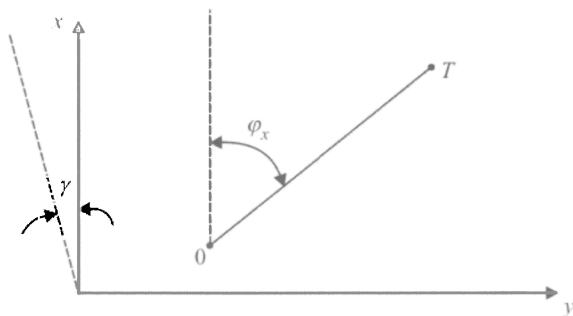


Рис. 7.9. Дирекционный угол в плоских прямоугольных координатах

7.1.2. Полигонные системы координат

Геодетические системы координат по ряду причин не могут использоваться для непосредственных наблюдений за объектами системами координат, обеспечивающими решение ряда задач испытаний. При полигонных измерениях пользуются несколькими простыми системами координат.

Непосредственное наблюдение за объектами и выдача данных с радиодальномеров, кинотеодолитов и кинотелескопов производится в местной полярной системе координат D, ε, β с началом ординат в точке стояния измерительного средства (рис. 7.10). Угол места отсчитывается от горизонтальной плоскости. Начало отсчета азимута β объекта производится от направления, зависящего от особенностей полигона и решаемых задач, и обеспечивает более простые начисления при пересчете в другие системы координат. Такими направлениями могут быть, например:

направление в точку падения ракеты (при измерении траектории баллистической ракеты);

направление на север (при решении задач противовоздушной обороны) и т.д.

Азимут отсчитывается по направлению часовой стрелки. Координата D дает наклонную дальность до цели.

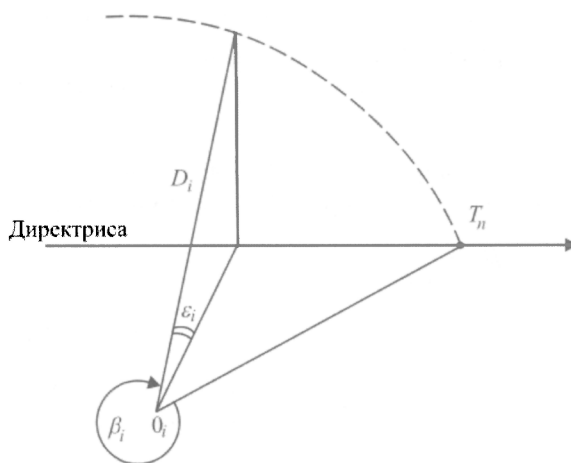


Рис. 7.10. Местная полярная система координат

Местная полярная система координат $D, \cos\theta_x, \cos\theta_y, \cos\theta_z$ используется в радиотехнических комплексах «Кубань» и фазовых пеленгаторах. Она удобна при переходе к прямоугольной координатной системе, так как преобразования при этом получаются очень простые. Координаты $\cos\theta_x, \cos\theta_y, \cos\theta_z$ являются направляющими косинусами углов между направлением на объект и соответствующими осями местной прямоугольной системы координат (рис. 7.11).

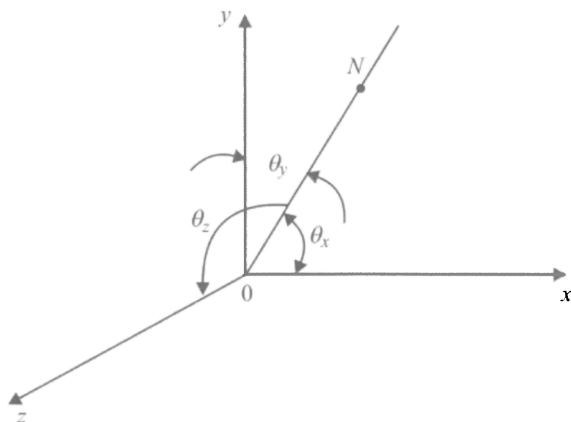


Рис. 7.11. Углы для измерительных средств

Направляющие косинусы для сокращения записи часто обозначают K_x, K_y, K_z . Измерительные средства выдают только два направляющих косинуса K_x и K_z . При необходимости K_y может быть вычислен из соотношения

$$K_x^2 + K_y^2 + K_z^2 = 1.$$

Зная направляющие косинусы, можно легко получить координаты ϵ и β . Для этого воспользуемся рис. 7.12. Из $\triangle Obc$ имеем

$$\operatorname{tg} \beta = -\frac{bc}{Oc}. \quad (7.11)$$

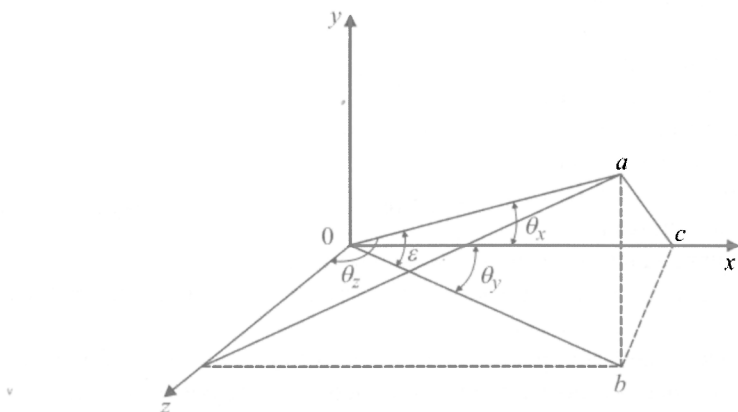


Рис. 7.12. Соотношение полярной и местной систем координат

В то же время

$$Oc = D \cos \theta_x, \quad bc = D \cos \theta_z.$$

Подставив эти значения в уравнение (7.11), получим

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\cos \theta_z}{\cos \theta_x}$$

или

$$\cos \beta = \frac{\cos \theta_x}{\sqrt{\cos^2 \theta_x + \cos^2 \theta_z}}. \quad (7.12)$$

В то же время

$$\cos \beta = \frac{Oc}{Ob}$$

или

$$\cos \beta = \frac{\cos \theta_x}{\cos \varepsilon}. \quad (7.13)$$

Подставив выражение (7.13) в зависимость (7.12), получим

$$\cos \varepsilon = \sqrt{\cos^2 \theta_x + \cos^2 \theta_z}. \quad (7.14)$$

Легко видеть, что обратными зависимостями являются:

$$\cos \theta_x = \cos \varepsilon \cos \beta; \quad \cos \theta_z = \cos \varepsilon \sin \beta. \quad (7.15)$$

Обе полярные системы координат являются первичными. Они недостаточно наглядны и неудобны для обработки, поэтому данные, полученные от измерительной аппаратуры, пересчитываются в местную систему координат x, y, z (рис. 7.13), где ось Oy направлена по нормали к поверхности эллипсоида Красовского. Направление оси Ox зависит от особенностей решаемых задач и удобства вычислений. Ось Oz дополняет систему.

Координаты в прямоугольной системе координат связаны с полярными координатами очевидными зависимостями:

$$\begin{aligned} x &= D \cos \theta_x, & x &= D \cos \varepsilon \cos \beta; \\ y &= D \cos \theta_y, & y &= D \sin \varepsilon; \\ z &= D \cos \theta_z, & z &= D \cos \varepsilon \sin \beta. \end{aligned} \quad (7.16)$$

Для получения общей траектории движения по данным отдельных измерительных пунктов вся информация из местных прямо-

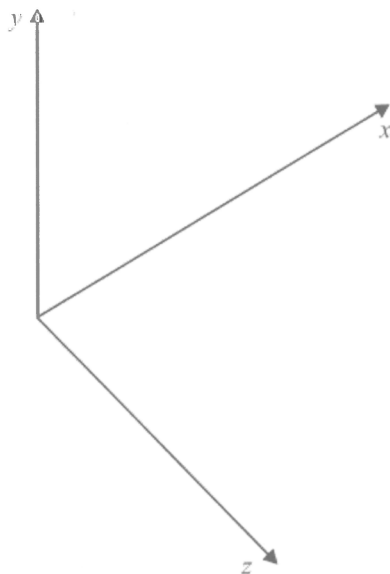


Рис. 7.13. Координаты прямоугольной системы

угольных систем координат пересчитывается в общую *полигонную прямоугольную систему координат* X, Y, Z . В этой системе ось OY направлена по нормали к эллипсоиду, ось OX – вдоль директрисы стрельбы, ось OZ дополняет систему до правой.

В тех случаях, когда измеряются траектории мишени и ракеты, создаются две полигонные системы координат. За начало координат одной системы принимается точка падения баллистической ракеты, за начало второй системы – точка старта противоракеты, причем в отличие от первой системы, вторая называется *стартовой системой координат*.

Произведя пересчет координат траектории из местных прямоугольных координатных систем в полигонную или стартовую при больших расстояниях между пунктами, необходимо учитывать кривизну Земли.

7.1.3. Перенос прямоугольных систем координат с учетом кривизны поверхности Земли

Перенос координат в полигонных условиях позволяет:

получить полную траекторию полета объекта по данным многопунктного измерительного комплекса;

произвести объединение информации от разных средств с целью повышения точности оценки параметров траектории. При этом одновременно восполняются и пропуски в измерениях оптимального варианта измерительных средств.

Измерительные пункты могут размещаться на расстояниях в несколько десятков и сотен километров, когда необходимо обязательно учитывать кривизну поверхности Земли. Прежде чем перейти к постановке и решению этой задачи, на-

помним некоторые известные положения из аналитической геометрии.

Параллельный перенос осей координат (рис. 7.14). Пусть координатная система x, y, z сдвинута в пространстве и занимает положение x', y', z' . Тогда уравнения, связывающие координаты точки в старой и новой системах координат, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}x &= x' + x_0, & x' &= x + x'_0; \\y &= y' + y_0, & y' &= y + y'_0; \\z &= z' + z_0, & z' &= z + z'_0,\end{aligned}\quad (7.17)$$

где x_0, y_0, z_0 – координаты нового начала в старой системе координат;

x'_0, y'_0, z'_0 – координаты начала старой системы в новой системе координат.

Поворот осей координат (рис. 7.15). Пусть координатная система x, y, z произвольно повернута в пространстве на некоторый угол, и имеет координатные оси x', y', z' .

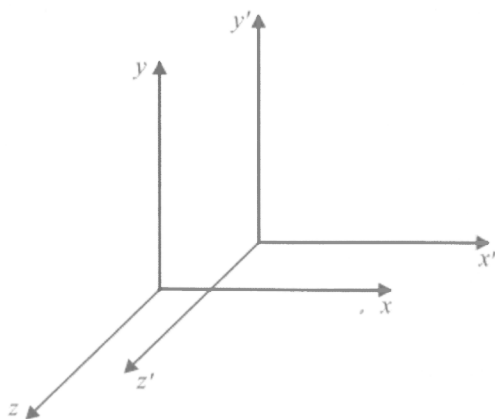


Рис. 7.14. Параллельный перенос осей координат

Уравнения, связывающие координаты точки в старой системе с новыми координатами, имеют при этом следующий вид:

$$\begin{aligned} x &= x' \cos(x', \wedge x) + y' \cos(y', \wedge x) + z' \cos(z', \wedge x); \\ y &= x' \cos(x', \wedge y) + y' \cos(y', \wedge y) + z' \cos(z', \wedge y); \end{aligned} \quad (7.18)$$

$$z = x' \cos(x', \wedge z) + y' \cos(y', \wedge z) + z' \cos(z', \wedge z);$$

$$\begin{aligned} x' &= xK_{x'x} + yK_{x'y} + zK_{x'z}; \\ y' &= xK_{y'x} + yK_{y'y} + zK_{y'z}; \end{aligned} \quad (7.19)$$

$$z' = xK_{z'x} + yK_{z'y} + zK_{z'z},$$

где $\cos(x', \wedge x) = K_{x'x}$ — направляющий косинус между осями x' и x ; $\cos(y', \wedge x) = K_{y'x}$ — направляющий косинус между осями y' и x и т.д.

Направляющие косинусы между осями обычно представляются в виде матриц

$$A = \begin{vmatrix} K_{x'x} & K_{y'x} & K_{z'x} \\ K_{x'y} & K_{y'y} & K_{z'y} \\ K_{x'z} & K_{y'z} & K_{z'z} \end{vmatrix}$$

или таблиц (табл. 7.1).

Поворот осей координат с переносом начала координат. При повороте осей с последующим переносом начала координатные системы уравнений, связывающие старую (x, y, z) и новую (x', y', z') системы координат, будут иметь вид

$$\begin{aligned} x &= x'K_{x'x} + y'K_{y'x} + z'K_{z'x} + x_0; \\ y &= x'K_{x'y} + y'K_{y'y} + z'K_{z'y} + y_0; \\ z &= x'K_{x'z} + y'K_{y'z} + z'K_{z'z} + z_0 \end{aligned} \quad (7.20)$$

или

$$\begin{aligned} x' &= xK_{x'x} + yK_{x'y} + zK_{x'z} + x'_0; \\ y' &= xK_{y'x} + yK_{y'y} + zK_{y'z} + y'_0; \\ z' &= xK_{z'x} + yK_{z'y} + zK_{z'z} + z'_0, \end{aligned} \quad (7.21)$$

где x_0, y_0, z_0 — старые координаты нового начала; x'_0, y'_0, z'_0 — новые координаты старого начала.

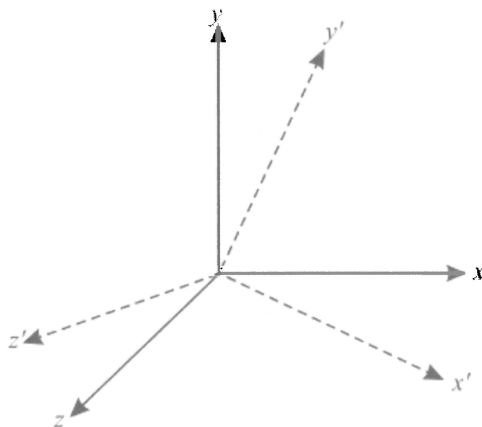


Рис. 7.15. Поворот осей координат

Таблица 7.1

	x'	y'	z'
x	$K_{x'x}$	$K_{y'x}$	$K_{z'x}$
y	$K_{x'y}$	$K_{y'y}$	$K_{z'y}$
z	$K_{x'z}$	$K_{y'z}$	$K_{z'z}$

Уравнения (7.20) и (7.21) получены путем поворота осей с последующим параллельным смещением их в новую точку. Иногда пользуются системами уравнений, полученных путем смещения осей в новую точку, а затем поворотом осей:

$$\begin{aligned}x' &= (x - x_0)K_{x'x} + (y - y_0)K_{x'y} + (z - z_0)K_{x'z}; \\y' &= (x - x_0)K_{y'x} + (y - y_0)K_{y'y} + (z - z_0)K_{y'z}; \\z' &= (x - x_0)K_{z'x} + (y - y_0)K_{z'y} + (z - z_0)K_{z'z}.\end{aligned}\tag{7.22}$$

Двойной перенос осей координат. При внешнетраекторных измерениях приходится решать задачу двойного переноса координат одной местной системы в центральную геодезическую систему координат, а затем из центральной геодезической системы во вторую местную систему координат. Это вызвано определенными трудностями при нахождении направляющих косинусов между осями координат.

Пусть имеется точка с координатами в прямоугольной системе x_i, y_i, z_i . Эти координаты необходимо перенести во вторую систему x, y, z . Направляющие косинусы между осями этих систем заданы

Таблица 7.2

	x_i	y_i	z_i
x	n_{11}	n_{12}	n_{13}
y	n_{21}	n_{22}	n_{23}
z	n_{31}	n_{32}	n_{33}

табл. 7.2. В свою очередь координаты точки из второй системы требуется перенести в систему координат x_j, y_j, z_j (направляющие косинусы между осями координат второй и третьей систем заданы (табл. 7.3)).

Таблица 7.3

	x	y	z
x_j	m_{11}	m_{12}	m_{13}
y_j	m_{21}	m_{22}	m_{23}
z_j	m_{31}	m_{32}	m_{33}

Первое преобразование (первый поворот осей) произведено в соответствии с матрицей **A**:

$$\begin{aligned}x &= n_{11}x_i + n_{12}y_i + n_{13}z_i; \\y &= n_{21}x_i + n_{22}y_i + n_{23}z_i; \\z &= n_{31}x_i + n_{32}y_i + n_{33}z_i.\end{aligned}\tag{7.23}$$

В свою очередь координаты x_j, y_j, z_j выражаются через координаты x, y, z в соответствии с матрицей **B**:

$$\begin{aligned}x_j &= m_{11}x + m_{12}y + m_{13}z; \\y_j &= m_{21}x + m_{22}y + m_{23}z; \\z_j &= m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z,\end{aligned}\tag{7.24}$$

что является вторым поворотом осей координат.

Если значения (7.23) подставить в уравнение (7.24), то получатся уравнения, связывающие первую и третью системы координат. Однако, преобразования легче осуществить, если использовать операции с матрицами направляющих косинусов.

Из алгебры известно, что коэффициенты результирующей системы уравнений (после двух поворотов осей) могут быть представлены в виде матрицы **C**, полученной в результате умножения матриц **A** и **B**:

$$\begin{vmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{vmatrix}. \quad (7.25)$$

При этом элемент матрицы **C**, стоящий на пересечении строки α и столбца β , получается путем умножения первого члена строки α матрицы **A** на первый член столбца β матрицы **B** и складывания с аналогичным произведением вторых членов, а затем и третьих. Кратко операция получения соответствующего члена матрицы может быть записана следующим образом:

$$l_{\alpha\beta} = \sum_{k=1}^3 n_{\alpha k} m_{k\beta}. \quad (7.26)$$

Например, элемент l_{13} матрицы **C** записывается в виде суммы

$$l_{13} = n_{11}m_{13} + n_{12}m_{23} + n_{13}m_{33}.$$

В результате двойного поворота осей системы координат уравнения преобразования имеют вид

$$x_j = l_{11}x_i + l_{12}y_i + l_{13}z_i;$$

$$y_j = l_{21}x_i + l_{22}y_i + l_{23}z_i;$$

$$z_j = l_{31}x_i + l_{32}y_i + l_{33}z_i.$$

В общем случае, когда перед двойным поворотом производится параллельное смещение осей координат, результирующие уравнения записываются в виде

$$x_j = (x_i - x_{ji})l_{11} + (y_i - y_{ji})l_{12} + (z_i - z_{ji})l_{13};$$

$$y_j = (x_i - x_{ji})l_{21} + (y_i - y_{ji})l_{22} + (z_i - z_{ji})l_{23}; \quad (7.27)$$

$$z_j = (x_i - x_{ji})l_{31} + (y_i - y_{ji})l_{32} + (z_i - z_{ji})l_{33},$$

где x_{ji} , y_{ji} , z_{ji} – координаты начала системы x_j , y_j , z_j в системе x_i , y_i , z_i .

7.1.4. Преобразование систем координат с учетом кривизны поверхности Земли

Как мы установили ранее, для преобразования координат из одной системы в другую необходимо знание координат начала одной системы во второй и направляющих косинусов между осями координат. В реальных условиях этих данных нет, поэтому задача преобразования координат усложняется необходимостью их определения.

Постановка задачи. Требуется преобразовать координаты точки из системы координат O_i , x_i , y_i , z_i в систему O_j , x_j , y_j , z_j если известны геодезические координаты пунктов L_i , L_j , B_i , B_j , и превышения их над поверхностью эллипсоида H_i , H_j , при этом оси ординат обеих систем направлены по нормали к поверхности эллипсоида, а оси абсцисс ориентированы относительно севера с азимутами A_i , A_j (рис. 7.16).

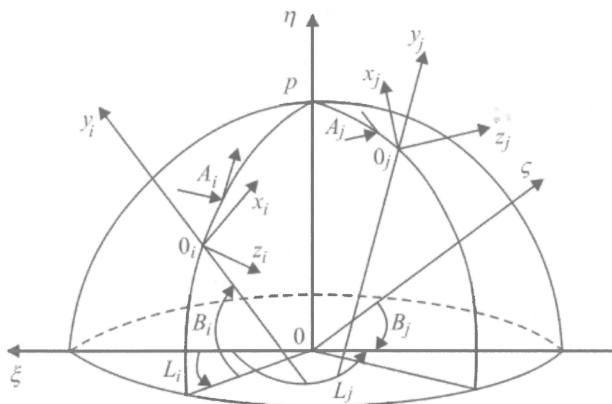


Рис. 7.16. Взаимосвязь геодезической и центральной систем координат

Решение задачи разобьем на четыре частные задачи:

- 1) определение положения точки O_i в центральной системе координат O, ξ, ζ, η ;
- 2) вычисление координат начала центральной системы в местной системе координат x_j, y_j, z_j ;
- 3) определение направляющих косинусов между осями центральной системы ξ, ζ, η и местными системами x_i, y_i, z_i и x_j, y_j, z_j ;
- 4) перенос координат траектории из системы координат x_i, y_i, z_i в систему координат x_j, y_j, z_j .

Определение положения точки O_i в центральной системе координат (рис. 7.16). При рассмотрении взаимосвязи между геодезической и центральной системами координат нами найдены уравнения (7.10) и (7.9), определяющие положение точки на поверхности Земли с координатами L_i и B_i и превышением над поверхностью эллипсоида H_i . Перепишем эти уравнения, введя соответствующие дополнительные индексы:

$$\begin{aligned} \xi_i &= (N_i + H_i) \cos B_i \cos L_i; \quad \zeta_i = (N_i + H_i) \cos B_i \sin L_i; \\ \eta_i &= \left[(1 - e^2) N_i + H_i \right] \sin B_i; \end{aligned} \quad (7.28)$$

$$N_i = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_i}}. \quad (7.29)$$

Это и есть координаты точки O_i в центральной системе координат.

Вычисление координат начала центральной системы в местной системе координат x_j, y_j, z_j (рис. 7.17). Напомним, что начало системы координат x_j, y_j, z_j находится в точке O_j с геодезическими координатами L_j и B_j . Ось Oy_j направлена по нормали к поверхности эллипсоида, ось Ox_j ориентирована по азимуту A_j относительно севера. Обозначим координаты центра Земли в системе координат x_j, y_j, z_j через x_{0j}, y_{0j}, z_{0j} . Решение задачи заключается в нахождении проекции точки O на оси координат x_j, y_j, z_j .

Для нахождения проекции точки O на ось y_j рассмотрим меридианную плоскость, проходящую через точку O_j (рис. 7.17), и вспомогательную систему линейных координат x, y .

Из рисунка видно, что

$$y_{0j} = -(N_j - c_1 c_2), \quad (7.30)$$

но

$$c_1 c_2 = O c_1 \sin B_j,$$

где $O c_1 = N_j \sin B_j - y$.

С другой стороны, учитывая уравнения (7.4), (7.8),

$$y = \frac{a(1 - e^2) \sin B_j}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_j}} = N_j (1 - e^2) \sin B_j.$$

Подставив значения составляющих в выражение (7.30), получим

$$y_{0j} = -N_j (1 - e^2 \sin^2 B_j). \quad (7.32)$$

Учитывая, что точка O_j в общем случае может иметь превышение над поверхностью эллипсоида H_j , имеем окончательно

$$y_{0j} = -N_j (1 - e^2 \sin^2 B_j) - H. \quad (7.33)$$

Для вычисления координат x_{0j} , и z_{0j} возьмем вспомогательную ось $O_j x'_j$, лежащую в меридианной плоскости с длиной L_j и направленную по касательной к сфероиду в точке O_j на север. Так как центр Земли лежит в плоскости меридиана, проекция центра Земли может быть только на оси y_j и x'_j .

Из рис. 7.17 видно, что координата центра Земли по оси $O_j x'_j$ равна отрезку

$$O c_2 = O c_1 \cos B_j,$$

где

$$O c_1 = N_j \sin B_j - y.$$

Учитывая выражение (7.31) получаем

$$O c_2 = O c_1 \cos B_j.$$

Ввиду того, что координатная ось x_j сдвинута на A_j по отношению к северу (рис. 7.18), проекция отрезка $O c_2$ на оси x_j , и z_j равны

$$x_{0j} = N_j e^2 \sin B_j \cos B_j \cos A_j; \quad z_{0j} = N_j e^2 \sin B_j \cos B_j \sin A_j.$$

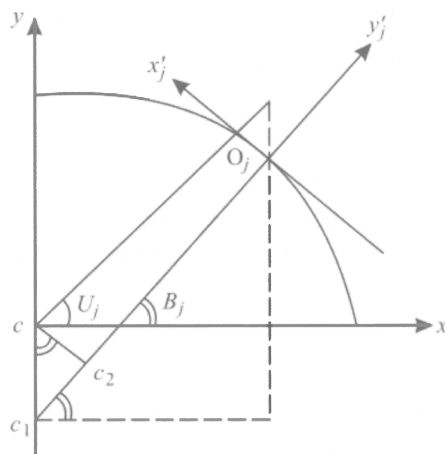


Рис. 7.17. Меридианная плоскость

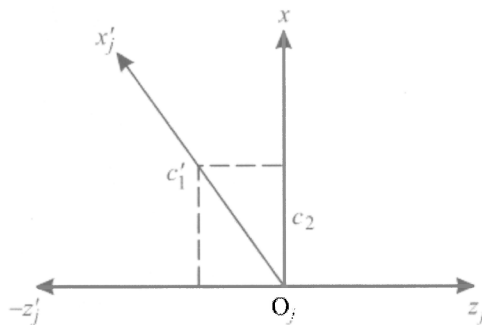


Рис. 7.18. Определение координат центра Земли

Таким образом, проекции центра Земли на оси координатной системы x_j, y_j, z_j имеют вид

$$\begin{aligned}x_{0j} &= N_j e^2 \sin B_j \cos B_j \cos A_j; \\y_{0j} &= -N_j(1 - e^2 \sin^2 B_j) - H_j; \\z_{0j} &= N_j e^2 \sin B_j \cos B_j \sin A_j.\end{aligned}\quad (7.34)$$

Определение направляющих косинусов. Для определения направляющих косинусов между осями центральной системы x_i, y_i, z_i и системы x_j, y_j, z_j необходимо найти координаты точки O_i в системе координат x_j, y_j, z_j , которые обозначим через x_{ij}, y_{ij}, z_{ij} .

Нам уже известны координаты точки O_i в центральной системе координат ξ, ζ, η , представленные в виде уравнений (7.28), и координаты центра Земли в системе координат x_j, y_j, z_j — уравнения (7.34).

Координаты точки O_i в системе координат x_j, y_j, z_j состоят из координат центра Земли (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}) и сумм проекций координат ξ_i, ζ_i, η_i на координатные оси x_j, y_j, z_j . Например, координата x_{ij} состоит из величины x_{0j} и суммы проекций координат ξ, ζ, η на ось x_j (условимся проекции величин обозначать при помощи скобок с указанием оси, на которую данная величина спроектирована).

Проведем через точку O_i меридианную плоскость n, O_j, m (рис. 7.19) и создадим вспомогательную систему координат x'_j, y'_j, z'_j , где ось x'_j ориентирована строго на север и находится в плоскости n, O_j, m .

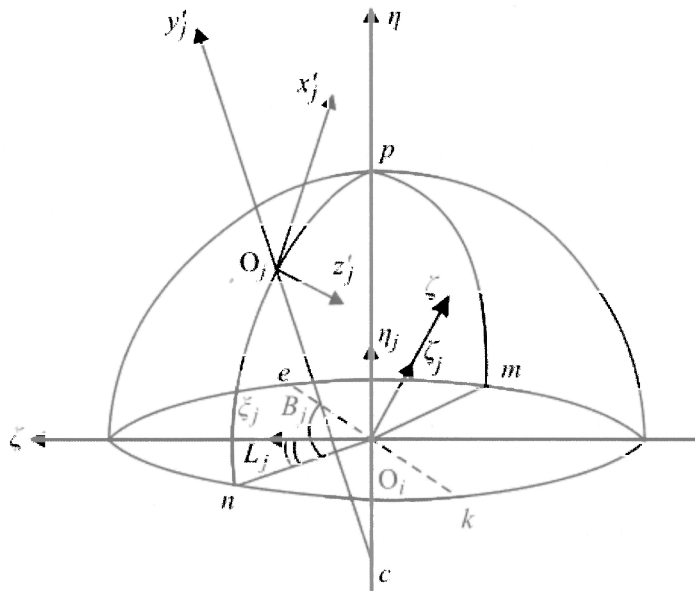


Рис. 7.19. Система определения направляющих косинусов

Сначала найдем проекции координаты ξ_i на оси x_j, y_j, z_j . Для этой цели разложим координату ξ_i на составляющие в плоскости trp и в плоскости lpk , взаимно перпендикулярной к плоскости trp . Так как операции разложения производятся в плоскости ξ_i, ζ_i , то воспользуемся рис. 7.20.

Проекция ξ_i на линии mn и lk соответственно равны:

$$(\xi_i)_{mH} = \xi_i \cos L_j;$$

$$(\xi_i)_{lk} = \xi_i \sin L_j.$$

Из рис. 7.21 найдем проекции ξ_i на оси координат в плоскости меридиана, проходящего через точку O_j :

$$[(\xi_i)_{mH}]_{x'i} = -\xi_i \cos L_j \sin B_i; \quad (7.35)$$

$$[(\xi_i)_{mn}]_{y'i} = -\xi_i \cos L_j \cos B_i. \quad (7.36)$$

Выражение (7.36) является окончательным (войдет составной частью в координату y_{ij}), а уравнение (7.35) будет использовано для дальнейшего преобразования – проектирования на оси x_j и z_j (рис. 7.22).

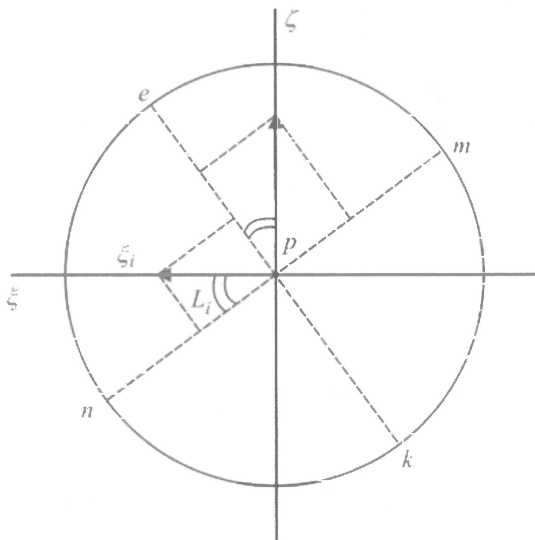


Рис. 7.20. Операция разложения в плоскости

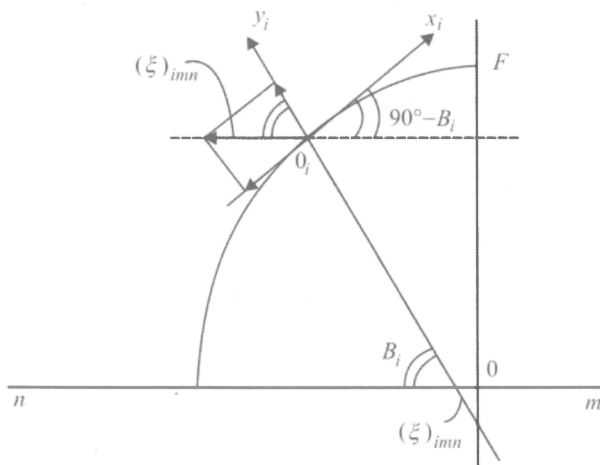


Рис. 7.21. Преобразования в оси координат

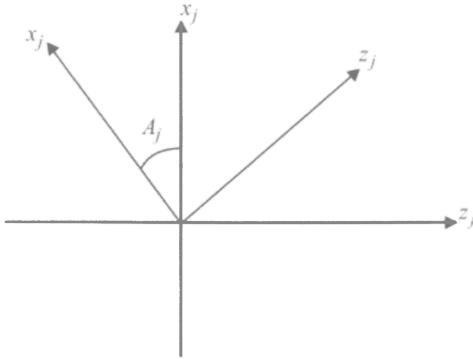


Рис. 7.22. Проекция оси координат

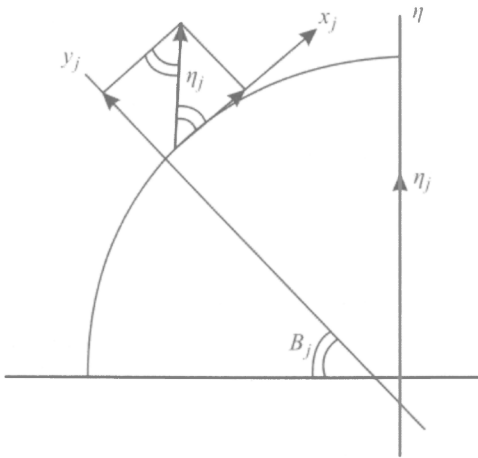


Рис. 7.23. Проекция составляющей координаты

Таким образом, выражения проекций составляющей (7.35) будут иметь вид

$$\left\{ [(\xi_i)_{mn}]_{x'_j} \right\}_{x_j} = -\xi_i \cos L_j \sin B_j \cos A_j; \quad (7.37)$$

$$\left\{ [(\xi_i)_{mn}]_{x'_j} \right\}_{z_j} = -\xi_i \cos L_j \sin B_j \cos A_j. \quad (7.38)$$

Теперь найдем проекции второй составляющей координаты $\xi_i - (\xi_i)_{lk}$ (рис. 7.23).

Так как линия lk перпендикулярна меридианной плоскости mpn (рис. 7.20), эта составляющая может спроектироваться только на вспомогательную ось z'_j , параллельную линии lk . Следовательно,

$$[(\xi_i)_{lk}]_{z'_j} = -\xi_i \sin L_j.$$

После проектирования полученного выражения на оси x_j и z_j имеем

$$\left\{ [(\xi_i)_{lk}]_{z'_j} \right\}_{x_j} = -\xi_i \sin L_j \cos A_j = (\xi_i)_{x_j}; \quad (7.39)$$

$$\left\{ [(\xi_i)_{lk}]_{z'_j} \right\}_{z_j} = -\xi_i \sin L_j \cos A_j = (\xi_i)_{z_j}. \quad (7.40)$$

Аналогично производится проектирование координат ξ_i и η_i на оси x_j, y_j, z_j . Окончательные выражения для проекций имеют вид

$$(\xi_i)_{x_j} = \xi_i (\sin L_j \sin B_j \cos A_j - \cos L_j \sin A_j);$$

$$(\xi_i)_{y_j} = -\xi_i \sin L_j \cos B_j;$$

$$(\xi_i)_{z_j} = -\xi_i (\cos L_j \cos A_j + \sin L_j \sin B_j \sin A_j);$$

$$(\eta_i)_{x_j} = \eta_i \cos B_j \cos A_j;$$

$$(\eta_i)_{y_j} = \eta_i \sin B_j;$$

$$(\eta_i)_{z_j} = -\eta_i \cos B_j \sin A_j.$$

Сгруппировав соответствующим образом проекции координат, получим:

$$\begin{aligned}
x_{ij} &= x_{0j} - \xi_i (\sin L_j \sin A_j + \cos L_j \sin B_j \cos A_j) + \eta_i \cos B_j \cos A_j + \\
&+ \zeta_i (\sin L_j \sin B_j \cos A_j - \cos L_j \sin A_j); \\
y_{ij} &= y_{0j} + \xi_i \cos L_j \cos B_j + \eta_i \sin B_j - \zeta_i \sin L_j \cos B_j; \\
z_{ij} &= z_{0j} + \xi_i (\cos L_j \sin B_j \sin A_j - \sin L_j \cos A_j + \eta_i \cos B_j \sin A_j + \\
&+ \zeta_i (\sin L_j \sin B_j \sin A_j + \cos L_j \cos A_j)).
\end{aligned}
\tag{7.41}$$

В уравнениях (7.41) коэффициенты при ξ_i , η_i , ζ_i являются постоянными для каждой координатной системы. Обозначив их буквами λ с индексами, имеем систему

$$\begin{aligned}
x_{ij} &= x_{0j} + \lambda_{11}\xi_i + \lambda_{12}\eta_i + \lambda_{13}\zeta_i; \\
y_{ij} &= y_{0j} + \lambda_{21}\xi_i + \lambda_{22}\eta_i + \lambda_{23}\zeta_i; \\
z_{ij} &= z_{0j} + \lambda_{31}\xi_i + \lambda_{32}\eta_i + \lambda_{33}\zeta_i.
\end{aligned}
\tag{7.42}$$

Получили формулы пересчета координаты точки O_i из центральной системы координат в систему x_j, y_j, z_j .

Сопоставив уравнения (7.42) и (7.21) видим, что коэффициенты λ есть ни что иное, как направляющие косинусы между осями центральной системы координат и осями системы x_j, y_j, z_j . Матрицу направляющих косинусов системы уравнений (7.42) представим в виде табл. 7.4.

Таблица 7.4

	ξ_i	η_i	ζ_i
x_{ij}	λ_{11} $-\sin A_j \sin L_j - \cos A_j \sin B_j \cos L_j$	λ_{12} $\cos A_j \cos B_j$	λ_{13} $-\sin A_j \cos L_j + \cos A_j \sin B_j \sin L_j$
y_{ij}	λ_{21} $\cos B_j \cos L_j$	λ_{22} $\sin B_j$	λ_{23} $-\cos B_j \sin L_j$
z_{ij}	λ_{31} $-\cos A_j \sin L_j + \sin A_j \sin B_j \cos L_j$	λ_{32} $-\sin A_j \cos B_j$	λ_{33} $-\cos A_j \cos L_j - \sin A_j \sin B_j \sin L_j$

Таблица 7.5

	ξ_j	η_j	ζ_j
x_{ji}	λ_{11} $-\sin A_i \sin L_i - \cos A_i \sin B_i \cos L_i$	λ_{12} $\cos A_i \cos B_i$	λ_{13} $-\sin A_i \cos L_i + \cos A_i \sin B_i \sin L_i$
y_{ji}	λ_{21} $\cos B_i \cos L_i$	λ_{22} $\sin B_i$	λ_{23} $-\cos B_i \sin L_i$
z_{ji}	λ_{31} $-\cos A_i \sin L_i + \sin A_i \sin B_i \cos L_i$	λ_{32} $-\sin A_i \cos B_i$	λ_{33} $-\cos A_i \cos L_i - \sin A_i \sin B_i \sin L_i$

Аналогично можно найти систему уравнений и матрицу направляющих косинусов (табл. 7.5) между осями центральной системы и системы x_i, y_i, z_i . В этом случае формулы отличаются только индексами:

$$\begin{aligned}x_{ji} &= x_{0i} + \gamma_{11}\xi_j + \gamma_{12}\eta_j + \gamma_{13}\zeta_j; \\y_{ji} &= y_{0i} + \gamma_{21}\xi_j + \gamma_{22}\eta_j + \gamma_{23}\zeta_j; \\z_{ji} &= z_{0i} + \gamma_{31}\xi_j + \gamma_{32}\eta_j + \gamma_{33}\zeta_j.\end{aligned}\quad (7.43)$$

В уравнениях (7.43) значения x_{0i}, y_{0i}, z_{0i} являются координатами центра Земли в системе x_i, y_i, z_i . В соответствии с уравнениями (7.34) они равны

$$\begin{aligned}x_{0i} &= N_i e^2 \sin B_i \cos B_i \cos A_i; \\y_{0i} &= -N_i e^2 (1 - e^2 \sin^2 B_i) - H_i; \\z_{0i} &= N_i e^2 \sin B_i \cos B_i \sin A_i.\end{aligned}\quad (7.44)$$

Перенос координат траектории. Из приведенных ранее рассуждений мы получили все необходимые данные для непосредственного решения поставленной задачи – переноса координат траектории из одной местной прямоугольной системы в другую (местную или полигонную прямоугольную систему координат). В действительности имеем:

матрицу направляющих косинусов λ между осями систем ξ, η, ζ и x_j, y_j, z_j ;
матрицу направляющих косинусов λ между осями систем ξ, η, ζ и x_i, y_i, z_i ;
 x_{ij}, y_{ij}, z_{ij} – координаты начала системы x_i, y_i, z_i в системе координат x_j, y_j, z_j ;
 $x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}, x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}$ – координаты начала центральной системы в местных системах координат;

ξ_i, η_i, ζ_i и ξ_j, η_j, ζ_j – координаты начала местных систем в центральной систем координат.

Решение задачи переноса координат из одной прямоугольной системы в другую заключается, во-первых, в параллельном переносе осей координат в новую точку и, во-вторых, в двойном повороте осей в соответствии с матрицами λ и γ . Этот случай в общем виде нами уже рассмотрен (7.27). Он заключается в составлении систем уравнений, матрица которых получается в результате умножения двух матриц преобразований:

$$\begin{vmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix}.$$

Результаты умножения матриц сведены в табл. 7.6, где $[x_j]_i, [y_j]_i, [z_j]_i$ – координаты объекта x_j, y_j, z_j в системе координат x_i, y_i, z_i .

Табл. 7.6 приведена для случая преобразования координат из системы x_j, y_j, z_j в систему x_i, y_i, z_i , но она справедлива и для обратного преобразования. Для этого достаточно заменить индексы j на i , и наоборот.

Таблица 7.6

	x_j	y_j	z_j
$[x_j]_i$	$\alpha_{11} = \lambda_{11}\gamma_{11} + \lambda_{12}\gamma_{21} + \gamma_{31}\lambda_{13}$	$\alpha_{12} = \lambda_{11}\gamma_{12} + \lambda_{12}\gamma_{22} + \lambda_{13}\gamma_{32}$	$\alpha_{13} = \lambda_{11}\gamma_{13} + \lambda_{13}\gamma_{23} + \lambda_{13}\gamma_{32}$
$[y_j]_i$	$\alpha_{21} = \lambda_{21}\gamma_{11} + \lambda_{22}\gamma_{21} + \lambda_{23}\gamma_{31}$	$\alpha_{22} = \lambda_{21}\gamma_{12} + \lambda_{22}\gamma_{22} + \gamma_{23}\gamma_{32}$	$\alpha_{23} = \lambda_{21}\gamma_{13} + \lambda_{22}\gamma_{23} + \lambda_{23}\gamma_{33}$
$[z_j]_i$	$\alpha_{31} = \lambda_{31}\gamma_{11} + \lambda_{32}\gamma_{21} + \lambda_{33}\gamma_{31}$	$\alpha_{32} = \lambda_{31}\gamma_{12} + \lambda_{32}\gamma_{22} + \lambda_{33}\gamma_{32}$	$\alpha_{33} = \lambda_{31}\gamma_{13} + \lambda_{32}\gamma_{33} + \lambda_{33}\gamma_{33}$

В соответствии с таблицей дадим и общую сводку формул преобразования координат:

$$\begin{aligned} [x_j]_i &= (x_j - x_{ij})\alpha_{11} + (y_j - y_{ij})\alpha_{12} + (z_j - z_{ij})\alpha_{13}; \\ [y_j]_i &= (x_j - x_{ij})\alpha_{21} + (y_j - y_{ij})\alpha_{22} + (z_j - z_{ij})\alpha_{23}; \\ [z_j]_i &= (x_j - x_{ij})\alpha_{31} + (y_j - y_{ij})\alpha_{32} + (z_j - z_{ij})\alpha_{33}; \end{aligned} \quad (7.45)$$

$$\begin{aligned} x_{ij} &= x_{0j} + \lambda_{11}\xi_i + \lambda_{12}\eta_i + \lambda_{13}\zeta_i; \\ y_{ij} &= y_{0j} + \lambda_{21}\xi_i + \lambda_{22}\eta_i + \lambda_{23}\zeta_i; \\ z_{ij} &= z_{0j} + \lambda_{31}\xi_i + \lambda_{32}\eta_i + \lambda_{33}\zeta_i; \end{aligned} \quad (7.46)$$

$$\begin{aligned} x_{0j} &= N_j e^2 \sin B_j \cos B_j \cos A_j; \\ y_{0j} &= -N_j e^2 (1 - e^2 \sin^2 B_j) - H_j; \\ z_{0j} &= N_j e^2 \sin B_j \cos B_j \sin A_j; \end{aligned} \quad (7.47)$$

$$\begin{aligned} \xi_i &= (N_i + H_i) \cos B_i \cos L_i; \\ \eta_i &= [N_i (1 - e^2) + H_i] \sin B_i; \\ \zeta_i &= (N_i + H_i) \cos B_i \sin L_i. \end{aligned} \quad (7.48)$$

Матрица коэффициентов λ , γ , α и величины, определяемые уравнениями (7.46)–(7.48), являются постоянными величинами для каждой пары координатных систем, т.е. для каждой пары измерительных пунктов, и вычисляются заблаговременно для всех вариантов. Поэтому пересчет координат сводится по существу к решению уравнений (7.45). С решением этой задачи в практике приходится встречаться очень часто, особенно на многопунктных измерительных комплексах для усреднения полученных результатов (по данным нескольких измерительных пунктов) и вычисления координат траектории в единой системе координат.

Следует заметить, что результаты вычислений будут справедливы только в том случае, когда нормаль к поверхности сфероида совпадает с направлением отвеса. Это объясняется тем, что первичные данные об объектах привязываются к направлению отвеса, по которому ориентируется аппаратура.

7.1.5. Астрономические системы координат

При определении траектории космических аппаратов, движущихся на значительном удалении от Земли, использование полигонных систем координат неудобно, так как вследствие собственного движения Земли необходима дополнительная привязка к неподвижным звездам или другим точкам небесной сферы. В связи с этим в практике внешнетраекторных измерений используют некоторые из астрономических систем координат.

В настоящее время хорошо известно, что все небесные светила находятся на разных расстояниях от Земли, а сама Земля вращается вокруг своей оси, создавая явления восхода и захода этих светил. Однако для решения ряда практических задач в астрономии пользуются древним понятием небесной сферы.

Под *небесной сферой* понимается сфера произвольного радиуса с центром либо в точке наблюдения, либо в центре Земли, либо в центре Солнца, в зависимости от необходимости. На эту сферу проецируются все небесные светила. При таком построении координаты светил определяются углами или соответствующими им дугами на небесной сфере. Если за центр сферы принимается место наблюдения, то системы координат называются *топоцентрическими*, если центр Земли – *геоцентрическими*, если центр Солнца – *гелиоцентрическими*.

Представим себе сферу, в центре которой находится наблюдатель. Через центр проведем отвесную линию, соответствующую направлению центра тяжести в данной точке. Продолжение ее пересечет небесную сферу в точках *зенита* Z_0 и *надира* Z_1 (под наблюдателем). Плоскость, перпендикулярная отвесной линии и проходящая через центр сферы, называется *плоскостью горизонта*, а линия, пересекающая центр сферы и параллельная оси вращения Земли, – *осью мира*.

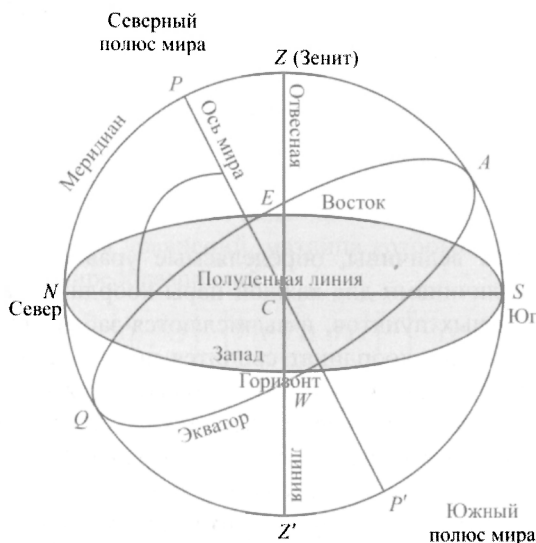


Рис. 7.24. Соотношение плоскостей и меридианов

Ось мира пересекает небесную сферу в точках, которые называются *северным* и *южным полюсами мира* (рис. 7.24).

При решении некоторых задач принимается, что наблюдатель неподвижен, а небесная сфера вращается вокруг оси мира с востока на запад, т.е. в направлении, обратном вращению Земли. Плоскость, проведенная через центр сферы и перпендикулярная оси мира, называется *плоскостью небесного экватора*.

Плоскость, проходящая через отвесную линию и полюса мира, пересекает небесную сферу по линии, которая называется *небесным меридианом*. Меридиан

пересекает плоскость горизонта в точках Севера N и Юга S . Линия NS называется *полуденной*. В свою очередь плоскость горизонта пересекает экваториальную плоскость в точках Востока E и Запада W .

Плоскости, проходящие через зенит, надир и любую точку небесной сферы, при пересечении с небесной сферой дают круги, называемые *вертикалями*. Плоскости, проходящие через ось мира и любую точку небесной сферы, при пересечении с небесной сферой дают круги, которые называются *кругами склонения*.

Если проследить движение светил на небесном своде, то можно увидеть, что вращаясь, они дважды пересекают меридиан (рис. 7.25): один раз, занимая самое высшее положение, другой раз – самое низшее. Моменты пересечения меридиана называются соответственно *верхней* и *нижней кульминациями светил*. Для некоторых светил нижняя кульминация происходит ниже горизонта и поэтому не видна. Например, момент верхней кульминации Солнца (истинный полдень) виден, а нижний (истинная полночь) не виден. Имеется много светил, верхняя и нижняя кульминации которых происходят за горизонтом, в южной небесной полусфере. Если наблюдатель на Земле переместится на другой земной меридиан, то соответственно изменится время верхней и нижней кульминации каждого из светил.

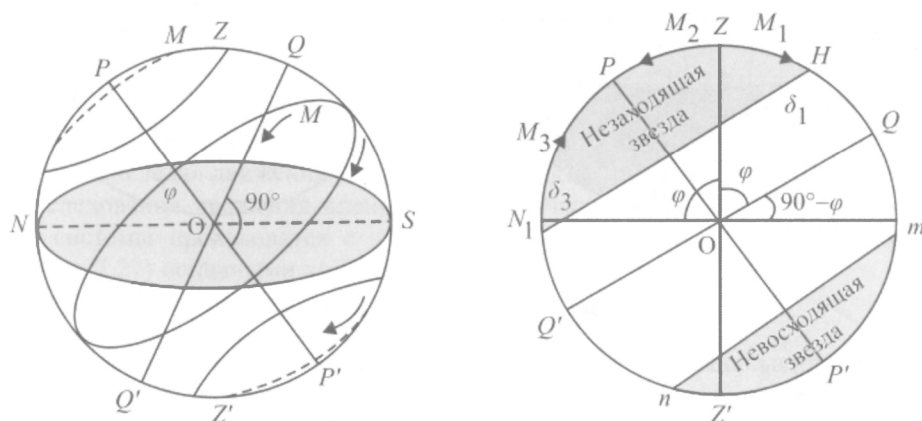


Рис. 7.25. Системы меридианов

Среди координатных систем, используемых в астрономии, чаще всего применяются *горизонтальная, первая и вторая экваториальные*. В каждой из этих систем положение точки на сфере характеризуется двумя координатами.

В горизонтальной системе координат основным кругом принимается горизонт.

Проведем плоскость через надир, зенит и светило. Координатами в этой системе являются (рис. 7.26):

высота светила – дуга h или угол между плоскостью горизонта и направлением на светило $LMOQ$;

азимут светила – дуга A или угол между плоскостью вертикали и плоскостью небесного меридиана $LSOQ$, отсчитываемый от юга по часовой стрелке (по направлению вращения небесной сферы от юга к западу).

Горизонтальные координаты светил (или космических летательных аппаратов) вследствие вращения небесной сферы все время меняются, поэтому необходимо указывать время, к которому эти координаты относятся. Горизонтальная система координат является *топоцентрической*. Основное достоинство горизонтальной системы заключается в простоте измерения координат светила, по которому можно определить место нахождения наблюдателя.

Однако знания горизонтальных координат недостаточно для решения других задач. Кроме того, горизонтальные координаты с течением времени непрерывно изменяются (вследствие вращения Земли) и зависят от места наблюдения на Земле, обуславливающего положение плоскости истинного горизонта.

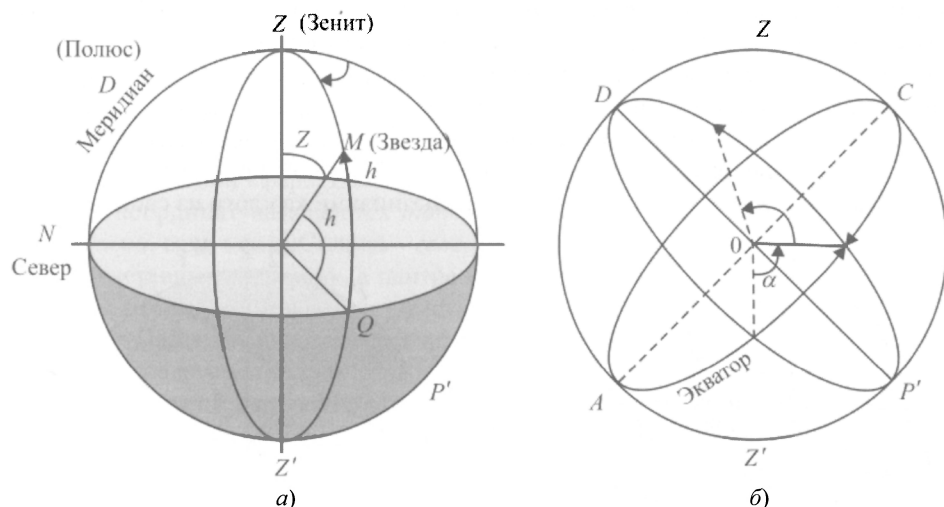


Рис. 7.26. Система небесных координат

В экваториальных системах координат основным кругом является небесный экватор. В первой экваториальной системе координатами являются (рис. 7.26):

часовой угол t – дуга экватора от меридиана до круга склонения, проходящего через светило (космический летательный аппарат) M или угол t между плоскостью меридиана и плоскостью круга склонения. В зависимости от направления отсчета часовой угол называют соответственно западным и восточным. Часовой угол измеряется либо в градусах (от 0 до 180°), либо в единицах времени;

склонение δ – дуга круга склонения от экватора до светила (объекта). Склонение измеряется в градусах (от 0 до 90°).

В этой системе координат при вращении небесной сферы склонение δ остается неизменным, часовой угол изменяется, поэтому следует указывать время, к которому относится данное положение светила.

Во второй экваториальной системе координат координатами являются:

склонение δ (то же, что и в первой экваториальной системе координат);

прямое восхождение α – дуга большого экватора от точки весеннего равноденствия γ до круга склонения, проходящего через светило (объект). Она отсчитывается

вается в направлении, обратном вращению небесной сферы в градусах (от 0 до 360°) или в часах (от 0 до 24^h).

Координаты второй экваториальной системы не изменяются при вращении небесной сферы, так как точка весеннего равноденствия, от которой производится отсчет, вращается вместе с небесной сферой. Вторая экваториальная система координат удобна для составления звездных карт и каталогов.

Точкой весеннего равноденствия называют точку на небесном экваторе, в которой Солнце бывает около 21 марта. В древности эта точка находилась в созвездии Овна, обозначаемом значком γ . В настоящее время она сместилась в созвездие Рыб, однако значок γ сохранился за точкой весеннего равноденствия и по сей день.

В связи с тем, что знания только одного направления на космический аппарат недостаточно, для решения задач полигонных измерений в горизонтальную и экваториальную системы координат вводится дополнительный параметр – дальность до объекта.

В ряде задач астрономии и при измерении координат космических аппаратов удобно пользоваться *геоцентрической экваториальной прямоугольной системой координат* ξ, η, ζ . Она близка к центральной геодезической системе и отличается от нее только тем, что ось ζ ориентирована не на гринвичский меридиан, а в точку весеннего равноденствия. Поэтому геоцентрическая экваториальная прямоугольная система координат не вращается вокруг оси η вместе с Землей.

При измерении космических объектов часто пользуются *геоцентрической прямоугольной системой координат* – долготой и широтой. Она используется для определения «следа» движения космических объектов на Земле.

Исследования движения планет или космических объектов в пределах солнечной системы производятся с помощью *эклиптической системы координат*. Здесь (рис. 7.27) основными кругами, относительно которых определяется положение объекта, являются *эклиптика* (плоскость, в которой Земля движется вокруг Солнца) и *круг широты объекта* (большой круг небесной сферы, проходящий через объект и полюсы эклиптики). Положение объекта определяется *астрономической долготой* λ и *астрономической широтой* β . Астрономическая долгота измеряется дугой эклиптики от точки весеннего равноденствия до круга широты в направлении видимого годового движения Солнца. Астрономическая широта измеряется дугой круга широты от эклиптики до светила в пределах от 0 до $+90^\circ$.

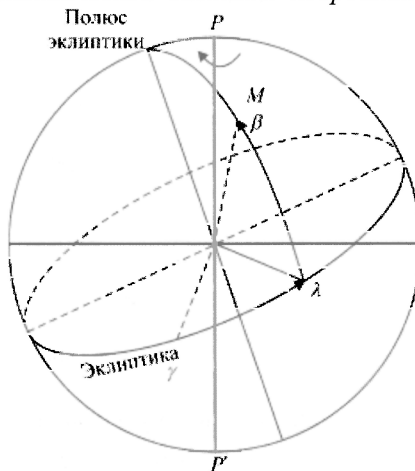


Рис. 7.27. Эклиптика небесной сферы

Введем понятие *астрономической широты места наблюдения* φ – угла между направлением отвесной линии и плоскостью экватора. Разность между астрономической широтой места наблюдения и геодезической широтой называется *уклонением места*: $\zeta = \varphi - B$.

Уклонения отвеса на Земле колеблются в среднем в пределах $\pm 4''$, однако имеется много мест в гористой местности и на равнине, где вследствие различия в плотности земных пород и по другим причинам эти уклонения достигают больших величин и их нельзя не учитывать. Так, например, в районе Москвы разность уклонений на отдельных направлениях достигает примерно $15''$, на Западном Кавказе – $45''$, в районе г. Орджоникидзе – $53''$ и т.д.

7.2. Взаимосвязь между системами координат, используемых при траекторных измерениях

Взаимосвязь между местной и горизонтальной системами координат. Пусть ось X местной прямоугольной системы координат ориентирована относительно Севера под азимутом A_x . Тогда, пользуясь рис. 7.28, можно написать выражения для местных координат через координаты горизонтальной системы:

$$\begin{aligned} X &= D \cos h \cos(A - 180^\circ - A_x) = -D \cos h \cos(A - A_x); \\ Y &= D \sin h; \\ Z &= D \cos h \sin(A - 180^\circ - A_x) = -D \cos h \sin(A - A_x). \end{aligned} \quad (7.49)$$

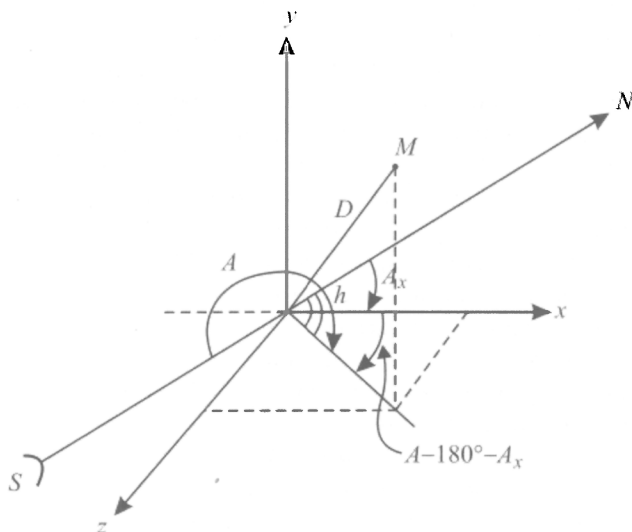


Рис. 7.28. Соответствие местной и горизонтальной систем координат

Решив эту систему уравнений относительно координат горизонтальной системы и имея в виду, что $X^2 + Y^2 + Z^2 = D^2$, получим

$$\sin h = \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}; \quad \cos(A - A_x) = -\frac{X}{\sqrt{X^2 + Z^2}} \quad (7.50)$$

или

$$\sin h = \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}; \quad \cos A = -\frac{Z \sin A_x - X \cos A_x}{\sqrt{X^2 + Z^2}}. \quad (7.51)$$

Взаимосвязь между местной и экваториальной геоцентрической и прямоугольной системами координат. Переход от местной и экваториальной геоцентрической прямоугольной системе координат может быть осуществлен в два приема:

- 1) переход от местной к центральной геодезической системе;
- 2) поворот осей координат ξ и ζ вокруг оси η на величину угла между кругом склонения, проходящего через Гринвич, и кругом склонения, проходящего через точку весеннего равноденствия.

Первая часть перехода рассматривается далее. Уравнение, связывающее местную центральную систему координат на основании (7.21), имеет вид

$$\begin{aligned} \xi &= (x - x_0)\gamma_{11} + (y - y_0)\gamma_{12} + (z - z_0)\gamma_{13}; \\ \eta &= (x - x_0)\gamma_{21} + (y - y_0)\gamma_{22} + (z - z_0)\gamma_{23}; \\ \zeta &= (x - x_0)\gamma_{31} + (y - y_0)\gamma_{32} + (z - z_0)\gamma_{33}, \end{aligned} \quad (7.52)$$

где x_0, y_0, z_0 – координаты начала центральной системы в местной системе координат, вычисляющиеся по формулам (7.34); γ – направляющие косинусы между осями местной и центральной систем координат (см. табл. 7.5).

Вторая часть перехода заключается в повороте центральной системы координат вокруг оси $O\eta$ на угол между плоскостями гринвичского круга склонения и круга склонения, проходящего через точку весеннего равноденствия. Обратившись ко второй экваториальной системе координат, видим, что это угол α (прямое восхождение гринвичского круга склонения).

Обозначив координаты экваториальной прямоугольной системы величинами $\bar{\xi}, \bar{\eta}, \bar{\zeta}$, получим уравнение связи:

$$\begin{aligned} \bar{\xi} &= \xi K_{11} + \eta K_{12} + \zeta K_{13}; \\ \bar{\eta} &= \xi K_{21} + \eta K_{22} + \zeta K_{23}; \\ \bar{\zeta} &= \xi K_{31} + \eta K_{32} + \zeta K_{33}. \end{aligned}$$

Пользуясь рис. 7.29 и учитывая, что направления отсчета α и долготы L , входящей в состав координат ξ, η, ζ , совпадают, составим таблицу направляющих косинусов (табл. 7.7).

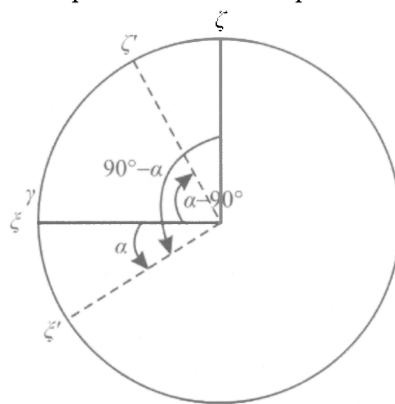


Рис. 7.29. Экваториальная система координат

Таблица 7.7

	ξ	η	ζ
$\bar{\xi}$	$K_{11} = \cos \alpha$	$K_{12} = 0$	$K_{13} = \cos(\alpha - 90^\circ)$
$\bar{\eta}$	$K_{21} = 0$	$K_{22} = 1$	$K_{23} = 0$
$\bar{\zeta}$	$K_{31} = \cos(90^\circ + \alpha)$	$K_{32} = 0$	$K_{33} = \cos \alpha$

Производя умножение матриц уравнений (7.52) и (7.53) и учитывая значения направляющих косинусов из табл. 7.7, найдем уравнения связи координат местной системы с координатами экваториальной прямоугольной системы:

$$\begin{aligned}\bar{\xi} &= (x - x_0)l_{11} + (y - y_0)l_{12} + (z - z_0)l_{13}; \\ \bar{\eta} &= (x - x_0)l_{21} + (y - y_0)l_{22} + (z - z_0)l_{23}; \\ \bar{\zeta} &= (x - x_0)l_{31} + (y - y_0)l_{32} + (z - z_0)l_{33}.\end{aligned}\quad (7.54)$$

Аналогично можно найти и формулы обратного преобразования:

$$\begin{aligned}x &= \bar{\xi}l_{11} + \bar{\eta}l_{21} + \bar{\zeta}l_{31} + x_0; \\ y &= \bar{\xi}l_{12} + \bar{\eta}l_{22} + \bar{\zeta}l_{32} + y_0; \\ z &= \bar{\xi}l_{13} + \bar{\eta}l_{23} + \bar{\zeta}l_{33} + z_0.\end{aligned}\quad (7.55)$$

Направляющие косинусы l имеют значения, которые сведены в табл. 7.8.

Таблица 7.8

	x	y	z
$\bar{\xi}$	$l_{11} = \gamma_{11} \cos \alpha + \gamma_{13} \cos(90^\circ + \alpha)$	$l_{12} = \gamma_{12}$	$l_{13} = \gamma_{11} \cos(\alpha - 90^\circ) + \gamma_{13} \cos \alpha$
$\bar{\eta}$	$l_{21} = \gamma_{21} \cos \alpha + \gamma_{23} \cos(90^\circ + \alpha)$	$l_{22} = \gamma_{22}$	$l_{23} = \gamma_{21} \cos(\alpha - 90^\circ) + \gamma_{23} \cos \alpha$
$\bar{\zeta}$	$l_{31} = \gamma_{31} \cos \alpha + \gamma_{33} \cos(90^\circ + \alpha)$	$l_{32} = \gamma_{32}$	$l_{33} = \gamma_{31} \cos(\alpha - 90^\circ) + \gamma_{33} \cos \alpha$

Параметр α – прямое восхождение круга склонения, проходящего через Гринвич. Вследствие вращения Земли он является величиной переменной, которая изменяется с изменением времени. Позже мы увидим, что α Гринвича равно гринвичскому звездному времени S , выраженному в градусах.

Взаимосвязь между горизонтальной и экваториальными системами координат. Связь между горизонтальной и экваториальными системами координат основывается на использовании основных формул сферической тригонометрии. Рассмотрим ее основные положения.

Задача сферической тригонометрии состоит в нахождении зависимостей между углами и сторонами треугольников, расположенных на сфере и полученных путем пересечения больших кругов.

Большим кругом на сфере называется окружность, полученная при пересечении сферы с плоскостью, проходящей через центр сферы. Если плоскость через центр не проходит, то окружность, полученная при сечении сферы, называется *малым кругом*.

Часть сферы, заключенная между полуокружностями двух больших кругов, называется *двуугольником* (рис. 7.30). Мерой двугранного угла в двуугольнике служит угол между касательными к окружностям в точке их пересечения, а также плоский угол в центре с дугой AB .

Сферическим треугольником (рис. 7.31) называется фигура на шаровой поверхности, образованная тремя дугами больших кругов, не проходящих через одну

точку. Рассматриваются только те сферические треугольники, у которых углы и стороны меньше 180° . Обозначим в сферическом треугольнике углы – A, B, C , а стороны – a, b, c . Если соединить вершины сферического треугольника с центром сферы, то в центре сферы получим трехгранный угол. При этом стороны сферического треугольника равны плоским углам трехгранника, а углы его – двугранным углам. Отсюда следует, что как стороны, так и углы сферического треугольника измеряются в градусной мере. Из свойств трехгранного угла вытекает, что сумма сторон сферического треугольника всегда меньше 360° :

$$a + b + c < 360^\circ,$$

а сумма углов находится в пределах

$$180^\circ < (A + B + C) < 540^\circ.$$

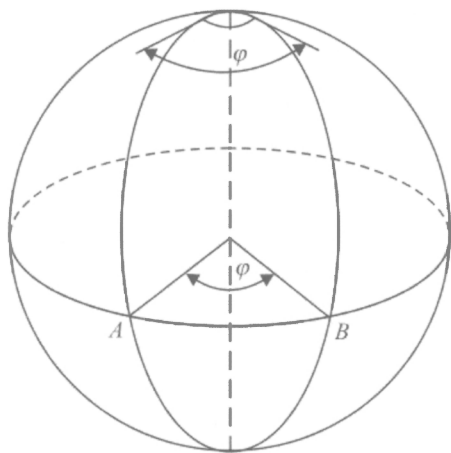


Рис. 7.30. Изображение двуугольника

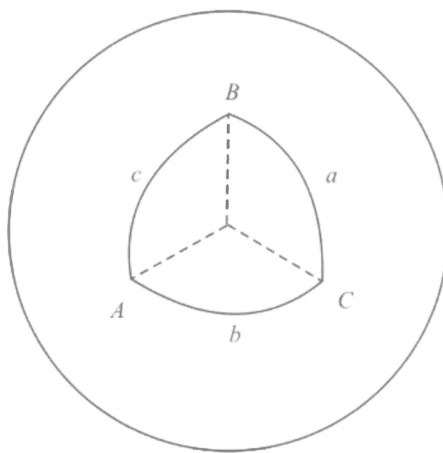


Рис. 7.31. Сферический треугольник

Между углами и сторонами сферического треугольника существуют определенные зависимости, составляющие формулы сферической тригонометрии. Существуют три основные формулы сферической тригонометрии:

формула косинусов

$$\cos \alpha = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cdot \cos A; \quad (7.56)$$

формула синусов

$$\frac{\sin \alpha}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C}; \quad (7.57)$$

формула пяти элементов

$$\sin \alpha \cos B = \sin c \cos b + \cos c \sin b \cos A. \quad (7.58)$$

Они применимы к любой стороне треугольника, для этого только необходимо стороны и углы заменить круговой подстановкой. Если один угол сферического треугольника является прямым, то треугольник называется прямоугольным.

В сферическом треугольнике все три угла могут быть прямыми, а все три стороны могут иметь по 90° . Треугольник, у которого хотя бы одна сторона равна 90° , называется прямоугольным. Имея теперь все необходимые данные для вывода формул перехода, обратимся к рис. 7.32, на котором изображены горизонтальная и экваториальная системы координат.

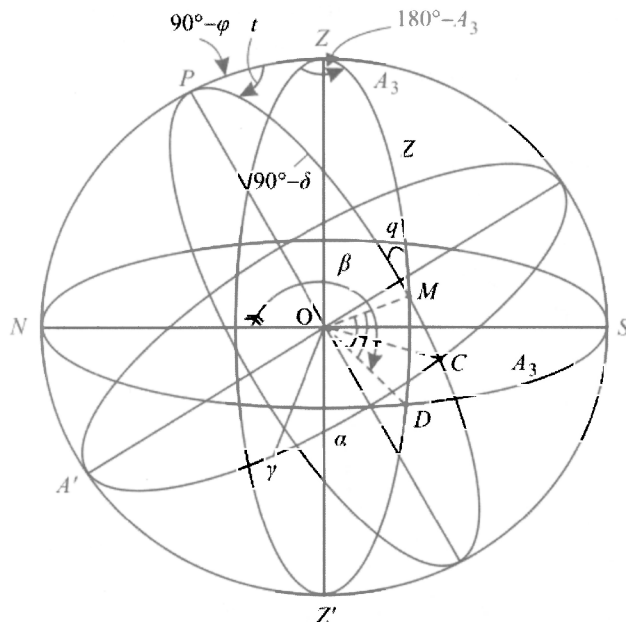


Рис. 7.32. Горизонтальная и экваториальная системы координат

В параллактическом треугольнике PZM одна из сторон – дуга небесного меридиана PZ между полюсом и зенитом – равна $(90^\circ - \varphi)$, где φ – астрономическая широта места наблюдения. Другая сторона меридиана MP – полярное расстояние точки M равна $(90^\circ - \delta)$, и третья сторона равна ее зенитному расстоянию Z . Если точка M (светило или комический аппарат) находится к западу от небесного меридиана, то угол при полюсе есть часовой угол t , угол при зените – $(180^\circ - A_3)$, где A_3 – азимут точки M . Если точка M находится на сфере к востоку от небесного меридиана, то угол при полюсе будет равен $(360^\circ - t)$, а угол при зените $A = 180^\circ$. Угол q при точке M называется параллактическим.

Найдем сначала формулы перехода от первой экваториальной системы к горизонтальной. Воспользуемся для этого тремя основными формулами сферической тригонометрии. При этом положим $a = z$, $b = 90^\circ - \delta$, $c = 90^\circ - \varphi$, $A = t$, $B = 180^\circ - A_3$. После подстановки этих значений в уравнения (7.56), (7.57), (7.58) получим:

$$\begin{aligned} \cos z &= \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t; \\ \sin z \sin A_3 &= \cos \delta \sin t; \\ \sin z \cos A_3 &= -\cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \cos t. \end{aligned} \quad (7.59)$$

7. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТРАЕКТОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ ВВТ

Первая из этих формул определяет зенитное расстояние, две другие – азимут. Учитывая, что зенитное расстояние

$$z = 90^\circ - h = 90^\circ - \varepsilon,$$

где h – высота объекта; ε – угол места. Из выражений (7.59) получаем следующие уравнения:

$$\begin{aligned}\sin \varepsilon &= \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t; \\ \sin A_3 &= \frac{\cos \delta}{\cos \varepsilon} \sin t.\end{aligned}\tag{7.60}$$

Для вывода формул обратного преобразования от горизонтальной системы координат к первой экваториальной системе координат положим

$$a = 90^\circ - d, \quad b = z, \quad c = 90^\circ - \varphi, \quad A = 180^\circ - A_3, \quad B = t.$$

Подставив эти значения в формулы сферической тригонометрии, получим

$$\begin{aligned}\sin \delta &= \sin \varphi \cos \varepsilon + \cos \varphi \sin z \cos A_3; \\ \cos \delta \sin t &= \sin z \sin A_3; \\ \cos \delta \cos t &= \sin z \cos \varphi + \sin z \sin \varphi \cos A_3.\end{aligned}\tag{7.61}$$

Далее (п. 7.7) будет показано,³⁰³ что часовой угол объекта на сфере равен звездному времени минус прямое восхождение этого объекта, т.е.

$$t = S - a.$$

Подставив эту зависимость в уравнение (7.59) и имея в виду, что

$$z = 90^\circ - h,$$

получим систему уравнений, связывающих вторую экваториальную систему с горизонтальной системой:

$$\begin{aligned}\cos h \sin A_3 &= \cos \delta \sin(S - \alpha); \\ \sin h &= \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos(S - \alpha); \\ \cos h \cos A_3 &= -\sin \delta \cos \varphi + \cos \delta \sin \varphi \cos(S - \alpha).\end{aligned}\tag{7.62}$$

Аналогично, используя уравнения (7.61), можно получить формулы обратного перехода:

$$\begin{aligned}\sin \delta &= \sin \varphi \sin h - \cos \varphi \cosh \cos A_3; \\ \cos \delta \sin(S - \alpha) &= \cos h \sin A_3; \\ \cos \delta \cos(S - \alpha) &= \sin h \cos \varphi + \cos h \sin \varphi \cos A_3.\end{aligned}\tag{7.63}$$

Строго говоря, формулы перехода от горизонтальных координат к экваториальным координатам справедливы, если эти системы топоцентрические, однако, если в качестве объектов служат звезды, то из-за дальности расстояний до звезд экваториальные координаты могут быть и геоцентрическими. В заключение приведем уравнения, связывающие вторую экваториальную и горизонтальную системы координат:

$$\begin{aligned}
\cos \beta \cos \lambda &= \cos \delta \cos \alpha; \\
\sin \beta &= \cos \varepsilon_3 \sin \delta - \sin \varepsilon_3 \cos \delta \sin \alpha; \\
\cos \beta \sin \lambda &= \sin \varepsilon_3 \sin \delta + \cos \varepsilon_3 \cos \delta \sin \alpha,
\end{aligned}
\tag{7.64}$$

где λ – эклиптическая долгота; β – эклиптическая широта; ε_3 – угол наклона эклиптики к экватору.

Наклон эклиптики к экватору периодически в течение столетий меняется. На данный период $\varepsilon_3 \approx 23^\circ$.

7.3. Методы получения траекторной информации

В общем виде математическую обработку внешнетраекторных измерений можно разбить на два основных этапа обработки результатов измерений: 1) предварительный, или первичный; 2) вторичный, или окончательный.

Под *первичной обработкой* понимается определение истинных значений первичных параметров, получаемых от измерительных средств (направляющих косинусов, азимута, угла места, дальности и т.п.) с учетом всех возможных поправок. *Вторичная обработка* – это получение окончательных или вторичных параметров (координат траектории, скорости движения объектов, относительных ординат и т.п.).

В процессе определения как вторичных, так и первичных параметров для повышения точности оценки используются различные статистические методы. Они будут подробно рассмотрены авторами далее.

Первичными параметрами траектории являются: дальность, выдаваемая радиодальномерами; направляющие косинусы, полученные с помощью фазовых пеленгаторов; азимут и угол места, определяемые кинотеодолитными станциями. Будем считать, что их истинные значения нам уже известны. Методов получения вторичных координат траектории много, однако в каждом конкретном случае наибольшую точность можно получить при вполне определенном сочетании измерительных средств. Нашей задачей является выявление условий, при которых применение того или иного метода даст в результате наибольшую точность.

7.3.1. Лучевой метод

Лучевой метод основан на измерении дальности D до объекта и его углового положения (углов азимута β и места ε или направляющих косинусов K_x и K_z). Координаты траектории в местной системе координат связаны с первичными параметрами известными уравнениями:

$$\begin{aligned}
x &= D \cos \varepsilon \cos \beta; \\
y &= D \sin \varepsilon; \\
z &= D \cos \varepsilon \sin \beta.
\end{aligned}
\tag{7.65}$$

$$\begin{aligned}
x &= DK_x; \\
y &= DK_y = D\sqrt{1 - K_x^2 - K_z^2}; \\
z &= DK_z.
\end{aligned}
\tag{7.66}$$

Средние квадратические ошибки измерения первичных параметров нам известны. Обозначим их через $\sigma D, \sigma \beta, \sigma \varepsilon, \sigma K_x, \sigma K_z$. Определим ошибки для координат x, y, z .

Координата x есть функция от первичных параметров

$$x = f(D, \beta, \varepsilon).$$

Если эта функция непрерывна и дифференцируема, а ошибки первичных параметров достаточно малы, то можно найти выражение для ее среднеквадратической ошибки σx . Пусть

$$D_0 + \Delta D, \quad \beta_0 + \Delta \beta, \quad \varepsilon_0 + \Delta \varepsilon,$$

где $D_0, \beta_0, \varepsilon_0$ – наиболее вероятные значения измеряемых первичных параметров; $\Delta D, \Delta \beta, \Delta \varepsilon$ – ошибки при измерении параметров.

Тогда

$$x = f(D_0 + \Delta D, \beta_0 + \Delta \beta, \varepsilon_0 + \Delta \varepsilon).$$

Разлагая последнее выражение в ряд Тейлора и пренебрегая степенями $\Delta D, \Delta \beta, \Delta \varepsilon$ выше первой (в силу допущения малости ошибок) получим

$$x = f(D_0, \beta_0, \varepsilon_0) + \Delta D \left(\frac{dx}{dD} \right)_0 + \Delta \beta \left(\frac{dx}{d\beta} \right)_0 + \Delta \varepsilon \left(\frac{dx}{d\varepsilon} \right)_0 + \dots, \quad (7.67)$$

где

$$\left(\frac{dx}{dD} \right)_0, \left(\frac{dx}{d\beta} \right)_0, \left(\frac{dx}{d\varepsilon} \right)_0$$

– значения частных производных в точках $D_0, \beta_0, \varepsilon_0$.

Примем без доказательств, что наиболее вероятным значением x есть функция от наиболее вероятных значений аргументов, т.е.

$$x_0 = f(D_0, \beta_0, \varepsilon_0).$$

Тогда отклонение функции x от ее наиболее вероятного значения будет равно

$$\eta = x - x_0 = \Delta D \left(\frac{dx}{dD} \right)_0 + \Delta \beta \left(\frac{dx}{d\beta} \right)_0 + \Delta \varepsilon \left(\frac{dx}{d\varepsilon} \right)_0.$$

Значения частных производных в точках наиболее вероятных значений аргументов – величины постоянные, отсюда

$$\eta = \Delta D A_D + \Delta \beta A_\beta + \Delta \varepsilon A_\varepsilon,$$

т.е. η – случайная величина, так как она равна сумме случайных величин.

По теореме сложения дисперсия суммы независимых случайных величин равна сумме дисперсий слагаемых

$$D_\eta = D[A_D \Delta D] + D[A_\beta \Delta \beta] + D[A_\varepsilon \Delta \varepsilon].$$

В соответствии со свойствами дисперсии постоянную величину можно выносить за знак дисперсии, возведя ее в квадрат, поэтому

$$D_{\eta} = A_D^2 D[\Delta D] + A_{\beta}^2 D[\Delta \beta] + A_{\varepsilon}^2 D[\Delta \varepsilon]$$

или

$$\eta = \sqrt{A_D^2 D[\Delta D] + A_{\beta}^2 D[\Delta \beta] + A_{\varepsilon}^2 D[\Delta \varepsilon]},$$

но, так как $\sigma\eta$ есть ничто иное, как σx , а

$$\sigma D^2 = D[\Delta D], \quad \sigma \beta^2 = D[\Delta \beta], \quad \sigma \varepsilon^2 = D[\Delta \varepsilon],$$

окончательно получим

$$\sigma x = \sqrt{\left(\frac{dx}{dD}\right)_0^2 \sigma D^2 + \left(\frac{dx}{d\beta}\right)_0^2 \sigma \beta^2 + \left(\frac{dx}{d\varepsilon}\right)_0^2 \sigma \varepsilon^2}. \quad (7.68)$$

Ввиду того, что производные вычисляются в точках наиболее вероятных значений параметров, часто бывает удобным представить выражение (7.68) через вторичные параметры. Взяв производные от первого уравнения системы (7.65) и рассмотрев рис. 7.13, получим

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dD} &= \cos \varepsilon \cos \beta \frac{D}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}; \\ \frac{dx}{d\varepsilon} &= -D \cos \beta \sin \varepsilon \frac{D \sin \varepsilon}{\sqrt{x^2 + z^2}} = -\frac{xy}{\sqrt{x^2 + z^2}}; \\ \frac{dx}{d\beta} &= -D \cos \varepsilon \sin \beta = -z. \end{aligned} \quad (7.69)$$

Подставив значения частных производных в уравнения (7.69), получим уравнение, которое используется при анализе точности лучевого метода:

$$\sigma \lambda = \sqrt{\frac{x^2}{x^2 + y^2 + z^2} \sigma D^2 + \frac{xy}{x^2 + z^2} \sigma \varepsilon^2 + z^2 \sigma \beta^2}. \quad (7.70)$$

Аналогично находим уравнение и для ошибки по высоте:

$$\sigma y = \sqrt{\frac{y^2}{x^2 + y^2 + z^2} \sigma D^2 + (x^2 + z^2) \sigma \varepsilon^2}. \quad (7.71)$$

Если заданы значения x , y , z , можно получить семейство кривых равных точностей, характеризующих каждое измерительное средство или их сочетание. Эти кривые для лучевого метода представлены на рис. 7.33 и 7.34.

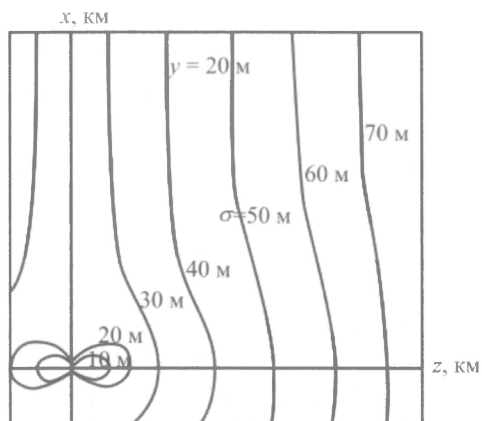


Рис. 7.33. Характеристики точностей, отождествляющие каждое измерительное средство

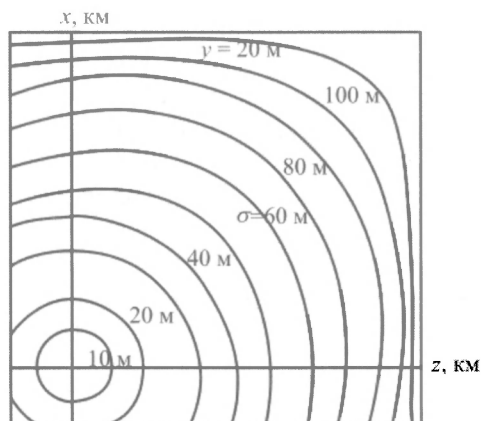


Рис. 7.34. Характеристики точностей, отождествляющие сочетание измерительных средств

Из рисунков видно, что с увеличением дальности линейные ошибки возрастают по всем направлениям, кроме направлений вдоль своих осей. Однако, использовать на практике это явление обычно не удастся, так как, во первых, выигрыш в точности получается только вдоль одной оси для данного расположения измерительного средства и, во вторых, только на очень малых высотах полета. В связи с этим следует считать характерным для этого метода увеличение ошибок с увеличением дальности до объекта.

В простейшем случае лучевой метод можно реализовать с помощью радиолокатора, но вследствие недостаточной точности измерения угла места и азимута линейные ошибки очень сильно возрастают с увеличением дальности (рис. 7.35), что ограничивает возможности использования радиолокатора малыми дальностями.

Если дальность измеряется радиодальномером, а угловые направления — фазовым пеленгатором, точность метода значительно возрастает. На рис. 7.35 представлена суммарная ошибка по всем трем координатам:

$$\sigma L = \sqrt{\sigma x^2 + \sigma y^2 + \sigma z^2}.$$

Еще большую точность можно получить при использовании кинотеодолитов для измерения угловых направлений, однако ограниченные дальности действия кинотеодолитов, влияние метеоусловий и невозможность автоматизации измерений ограничивают их применение.

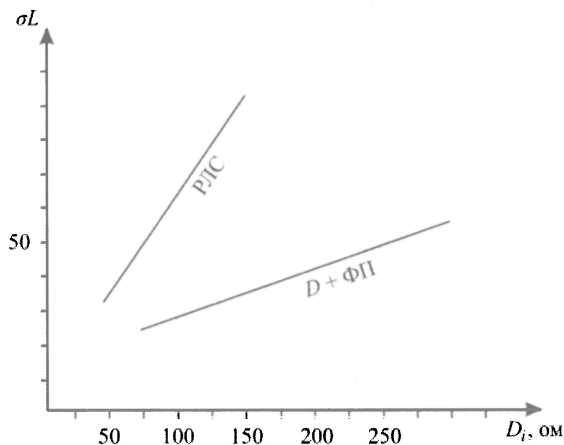


Рис. 7.35. Суммарная ошибка по трем координатам

При использовании фазовых пеленгаторов (ФП) и кинотеодолитов начала координатных систем не совпадают. Возможно два случая:

радиодальномер и фазовый пеленгатор находятся близко и кривизну земной поверхности можно не учитывать;

радиодальномер и фазовый пеленгатор находится на разных измерительных пунктах на значительном удалении друг от друга.

Рассмотрим особенности вычисления координат в обоих случаях.

В общем случае, когда радиодальномер и угломерное устройство расположены на разных измерительных пунктах, этот метод определения координат нельзя считать лучевым. Правильнее назвать его угломерно-дальномерным – промежуточным между лучевым методом и пеленгационным методом. Тем не менее методика расчета близка к лучевому методу. Найдем уравнения для вычисления координат траектории при несовпадении начал координатных систем.

Пусть кинотеодолит или фазовый пеленгатор расположены в точке O_i , а радиодальномер в точке O_j . Радиодальномер измеряет дальность D_j , а угломерное устройство – направляющие косинусы K_{xi}, K_{zi} или азимут β_i и угол места ε_i . Координаты траектории можно вычислить с помощью уравнений

$$\begin{aligned}x_i &= D_i K_{xi} = D_i \cos \beta_i \cos \varepsilon_i; \\y_i &= D_i K_{yi} = D_i \sin \varepsilon_i; \\z_i &= D_i K_{zi} = D_i \sin \beta_i \cos \varepsilon_i.\end{aligned}\tag{7.72}$$

Дальность D_i нам известна. Она может быть определена из $\Delta O_i O_j P$ (рис. 7.36). По теореме косинусов

$$D_j^2 = D_i^2 + B^2 - 2D_i B \cos \mu_i.$$

Решая это уравнение относительно D_i , получаем

$$D_i = B \cos \mu_i \pm \sqrt{D_j^2 - B^2 \sin^2 \mu_i}.\tag{7.73}$$

База, т.е. кратчайшее расстояние между точками O_j и O_i , может быть вычислена по формуле

$$B = \sqrt{x_{ji}^2 + y_{ji}^2 + z_{ji}^2},$$

где x_{ji}, y_{ji}, z_{ji} – координаты точки O_j в системе координат x_i, y_i, z_i .

Угол μ_i нам пока неизвестен. Для определения его значения воспользуемся рис. 7.36.

Таким образом, координаты рассчитываются по следующим формулам:

$$x_i = D_i K_{xi}; \quad y_i = D_i K_{yi}; \quad z_i = D_i K_{zi};$$

$$D_i = B \cos \mu_i \pm \sqrt{D_j^2 - B^2(1 - \cos^2 \mu_i)};$$

$$\cos \mu_i = K_{xi} \cos B_{xi} + K_{yi} \cos B_{yi} + K_{zi} \cos B_{zi}; \quad (7.77)$$

$$B = \sqrt{x_{ji}^2 + y_{ji}^2 + z_{ji}^2}.$$

При вычислении наклонной дальности D_i возможны два ее значения в зависимости от знака перед корнем. В случае, если $D_i > B$, корень берется с положительным знаком. Если $D_i < B$, знак перед корнем необходимо определить. Для этого вычисляются два значения ε_j (одно для знака плюс, другое для знака минус) и сравниваются с грубым значением угла места, полученного в результате измерений РЛС. По совпадению угла места $\varepsilon_{j\text{РЛС}}$ с одним из его расчетных значений судят о знаке перед корнем.

При использовании кинотеодолита вместо фазового пеленгатора значения направляющих косинусов вычисляются по измерениям угла места и азимута.

Следует отметить, что точность вычисления координат по данным радиодальномера и фазового пеленгатора, расположенных на разных измерительных пунктах, несколько понижается в сравнении с тем случаем, когда они находятся на одном измерительном пункте, так как возникают дополнительные ошибки за счет:

несинхронности работы сигналов единого времени двух измерительных пунктов; неточности привязки координатных систем измерительных средств к сфероиду; сокращений и округлений при пересчетах.

В случае расположения измерительных средств на небольших расстояниях, когда можно пренебречь кривизной Земли, уравнения (7.77) упрощаются, поскольку нет необходимости в вычислении базы B и направляющих косинусов между базой и осями координат.

За начало координат принимается центр антенного поля фазового пеленгатора O_i . Точка стояния радиодальномера в данной системе координат определяется величинами x_{Di}, y_{Di}, z_{Di} . База между центрами антенных систем подсчитывается по формуле

$$B = \sqrt{x_{Di}^2 + y_{Di}^2 + z_{Di}^2},$$

где координата y_{Di} есть разность превышений высот точек стояния аппаратуры H_i и H_{Di} :

$$y_{Di} = H_{Di} - H_i.$$

Наклонная дальность r_i вычисляется по той же формуле:

$$r_i = b \cos \mu_i + \sqrt{D_i^2 - b^2 \sin^2 \mu_i}$$

с той разницей, что перед корнем всегда должен стоять знак плюс, так как $B \ll D_i$.

Уравнения для вычисления μ_i удобнее в этом случае представить в виде:

$$\cos \mu_i = \frac{1}{b} (x_{Di} K_{xi} + y_{Di} K_{yi} + z_{Di} K_{zi}).$$

Иногда координаты точек стояния фазового пеленгатора и радиодальномера известны в системе координат Гаусса. Это связано с тем, что в данной системе координат строятся географические карты и при разбивке полигонов запланированные точки снимаются с карты на местность. В этом случае необходим пересчет из системы координат Гаусса в местную прямоугольную систему координат, для чего надо знать:

φ_x — дирекционный угол
оси x_i ;

x_0, y_0 — координаты Гаусса
начала местной системы координат (координат центра антенного поля фазового пеленгатора);

x_D, y_D — координаты Гаусса
точки стояния радиодальномера.

Вычисление координат точки стояния радиодальномера (рис. 7.37) x_{Di}, y_{Di} производится по формулам переноса начала координат с поворотом на φ_x .

Применительно к обозначениям, принятым для данного случая уравнения пересчета будут иметь вид

$$x_D = (x_D - x_0) \cos \varphi_x + (y_D - y_0) \cos(90^\circ - \varphi_x);$$

$$z_{Di} = (x_D - x_0) \cos \varphi(90^\circ + \varphi_x) + (y_D - y_0) \cos \varphi_x$$

или после упрощений

$$\begin{aligned} x_{Di} &= (y_D - y_0) \sin \varphi_x + (x_D - x_0) \cos \varphi_x; \\ z_{Di} &= (y_D - y_0) \cos \varphi_x - (x_D - x_0) \sin \varphi_x. \end{aligned} \quad (7.78)$$

Базу B между центром антенного поля фазового пеленгатора и точкой стояния радиодальномера можно вычислить и по данным гауссовской системы координат:

$$B = \sqrt{(x_D - x_0)^2 + (y_D - y_0)^2 + (H_{Di} - H_i)^2}.$$

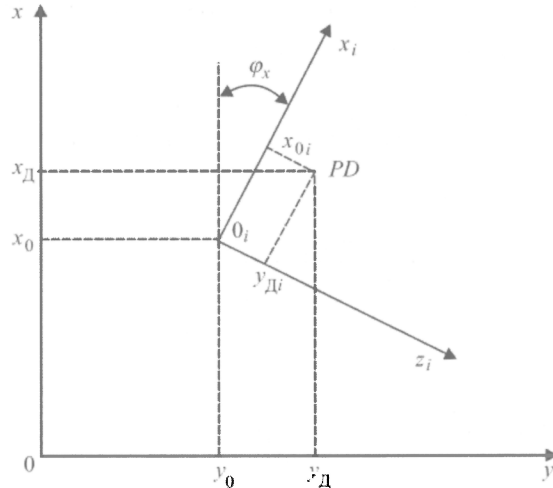


Рис. 7.37. Пеленгационный метод

7.3.2. Пеленгационный метод

При пеленгационном методе измеряются угловые направления на летящий объект с двух измерительных пунктов. Зная расстояние между пунктами и решая треугольник засечек, мы можем определить координаты объектов. Измерительными средствами для пеленгационного метода служат фазовые пеленгаторы и кинотеодолиты.

Пусть в точках O_i и O_j (рис. 7.38) размещены центры антенных полей двух фазовых пеленгаторов, которые измеряют K_{xi} , K_{zi} , K_{xj} , K_{zj} соответственно. Прямоугольные координаты траектории

$$x_i = D_i K_{xi}, \quad y_i = D_i K_{yi}, \quad z_i = D_i K_{zi}. \quad (7.79)$$

Величина D_i неизвестна и может быть определена из $\Delta O_i O_j P$ (рис. 7.38) на основании теоремы синусов

$$\frac{D_i}{\sin \mu_j} = \frac{B}{\sin [180^\circ - (\mu_i + \mu_j)]} = \frac{B}{\sin(\mu_i + \mu_j)}.$$

Отсюда

$$D_i = B \frac{\sin \mu_j}{\sin(\mu_j + \sin \mu_i)}.$$

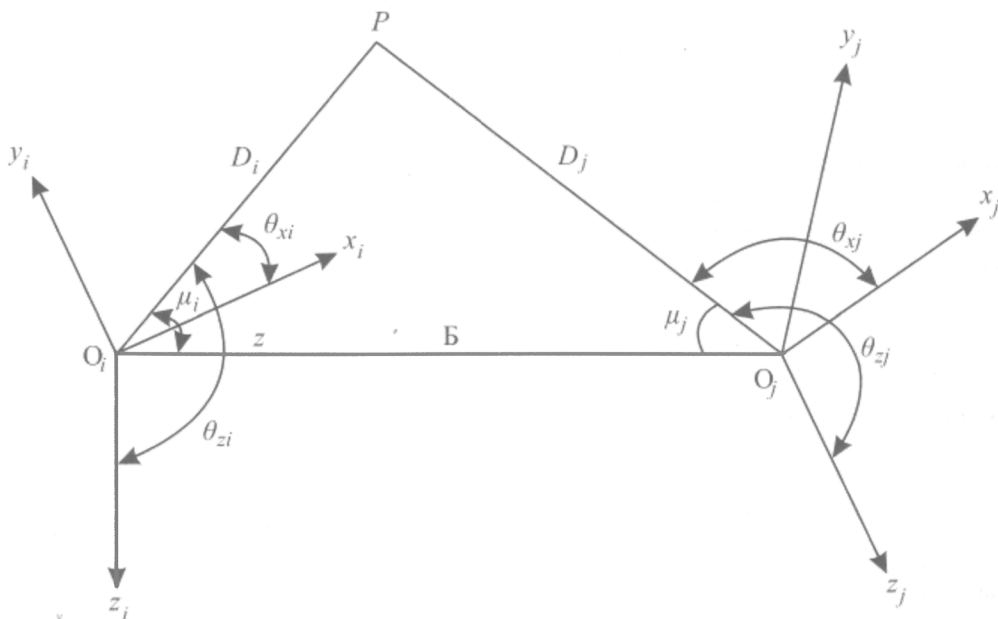


Рис. 7.38. Определение угловых направлений

Угол μ_j находим из выражения (7.12):

$$\cos \mu_i = K_{xi} \cos B_{xi} + K_{yi} \cos B_{yi} + K_{zi} \cos B_{zi}.$$

По аналогии

$$\cos \mu_j = K_{xj} \cos B_{xj} + K_{yj} \cos B_{yj} + K_{zj} \cos B_{zj},$$

где $\cos B_{xj}$, $\cos B_{yj}$, $\cos B_{zj}$ – направляющие косинусы между направлением базы и осями координат x_j, y_j, z_j , которые вычисляются с помощью выражений:

$$\cos B_{xj} = \frac{x_{ij}}{B}, \quad \cos B_{yj} = \frac{y_{ij}}{B}, \quad \cos B_{zj} = \frac{z_{ij}}{B}.$$

В свою очередь значения x_{ij}, y_{ij}, z_{ij} определяются с помощью уравнений (7.79).

Таким образом, расчетными уравнениями пеленгационного метода являются

$$\begin{aligned} x_i &= D_i K_{xi}; \quad y_i = D_i K_{yi}; \quad z_i = D_i K_{zi}; \quad D_i = B \frac{\sin \mu_j}{\sin(\mu_j + \mu_i)}; \\ \cos \mu_i &= K_{xi} \cos B_{xi} + K_{yi} \cos B_{yi} + K_{zi} \cos B_{zi}; \\ \cos \mu_j &= K_{xj} \cos B_{xj} + K_{yj} \cos B_{yj} + K_{zj} \cos B_{zj}. \end{aligned} \quad (7.80)$$

При использовании кинотеодолитов вместо одного или обоих фазовых пеленгаторов направляющие косинусы вычисляются как и ранее по известным уже формулам:

$$K_{xi} = \cos \beta_i \cos \varepsilon_i; \quad K_{yi} = \sin \varepsilon_i; \quad K_{zi} = \cos \varepsilon_i \sin \beta_i.$$

Уравнения (7.16) слишком сложны для вычисления ошибок пеленгационного метода, поэтому рассмотрим более простой частный случай плоской Земли (рис. 7.39).

Пусть начало координатной системы x_i, y_i, z_i совпадает с центром антенного поля первого пеленгатора. В точке j находится центр антенного поля второго пеленгатора, у которого ось z_j совпадает с осью z_i первого пеленгатора. Отсюда

$$\cos \mu_i = \cos \theta_{zi} = K_{zi}, \quad \cos \mu_j = \cos(180^\circ - \theta_{zj}) = -K_{zj}. \quad (7.81)$$

Координата x при привязке в точке i в соответствии с (7.16) может быть записана в виде

$$x = B \frac{\sin \mu_j}{\sin(\mu_i + \mu_j)} K_{xi}.$$

Подставив значения (7.17) в последнее уравнение, получим

$$x = B \frac{K_{xi} \sqrt{1 - K_{zj}^2}}{K_{zi} \sqrt{1 - K_{zj}^2} - K_{zj} \sqrt{1 - K_{zi}^2}}.$$

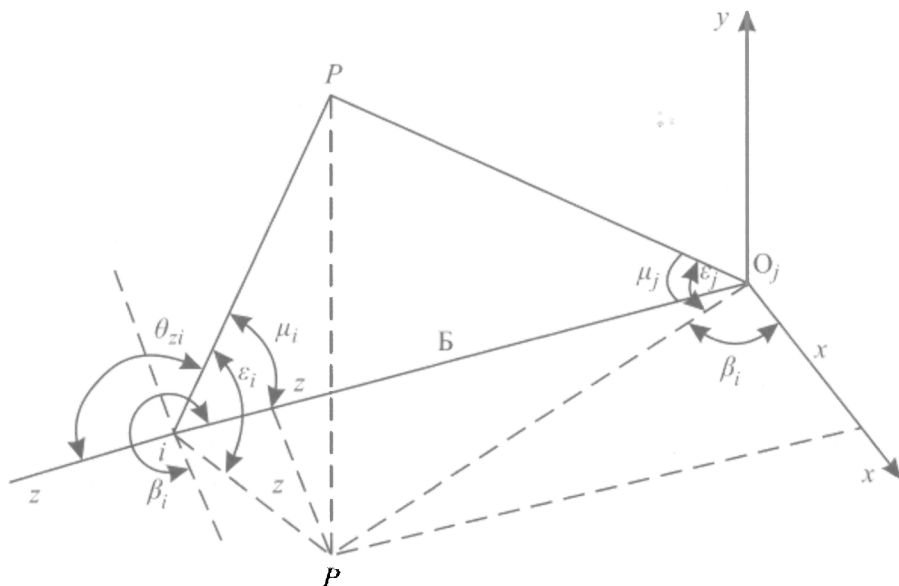


Рис. 7.39. Вычисление ошибок пеленгационного метода

Введя обозначение

$$K_{zi} \sqrt{1 - K_{zj}^2} - K_{zj} \sqrt{1 - K_{zi}^2} = A_z,$$

будем иметь

$$x = B \frac{K_{xi} \sqrt{1 - K_{zj}^2}}{A_z}. \quad (7.82)$$

Аналогично можно найти другие координаты:

$$z = B \frac{K_{zi} \sqrt{1 - K_{zj}^2}}{A_z};$$

$$y = B \frac{\sqrt{1 - K_{zj}^2} \sqrt{1 - K_{xi}^2 - K_{zi}^2}}{A_z}.$$

Полученные формулы носят иногда название формул «прямой засечки». Они имеют несколько иной вид, если сделать привязку к точке стояния второго фазового пеленгатора.

Ввиду того, что в формулах использованы три из четырех известных направляющих косинусов, можно найти другие варианты формул определения координат пеленгационным методом.

Полученные выражения позволяют рассмотреть точностные характеристики метода. Воспользуемся известным уже правилом нахождения ошибок метода.

Применительно к полученной функциональной зависимости для x напомним выражение ошибки:

$$\sigma x = B \sqrt{\left(\frac{dx}{dK_{xi}}\right)^2 \sigma^2(K_{xi}) + \left(\frac{dx}{dK_{zj}}\right)^2 \sigma^2(K_{zj})}. \quad (7.83)$$

Так как ошибки измерения направляющих косинусов обоих фазовых пеленгаторов по осям x и z равны

$$\sigma(K_{xi}) = \sigma(K_{zi}) = \sigma(K_{zj}) = \sigma(K_{xi}) = \sigma K,$$

уравнение (7.19) можно записать в виде

$$\sigma x = B \sigma K \sqrt{\left(\frac{dx}{dK_{xi}}\right)^2 + \left(\frac{dx}{dK_{zj}}\right)^2} = B \sigma K W_x.$$

Аналогично представляются ошибки и по другим координатам:

$$\sigma y = B \sigma K W_y, \quad \sigma z = B \sigma K W_z.$$

Ошибки зависят от базы между пеленгаторами.

Для более четкого выявления закономерностей ошибок и удобства пользования на практике часто берут относительные ошибки:

$$\frac{dx}{B} = \sigma K W_x; \quad \frac{dy}{B} = \sigma K W_y; \quad \frac{dz}{B} = \sigma K W_z. \quad (7.84)$$

Как видно из уравнения (7.84), относительные ошибки определяются ошибками измерения направляющих косинусов σK и коэффициентов W , зависящих от местоположения объектов и измерительных пунктов. Коэффициенты W_x, W_y, W_z равны корню квадратному из суммы квадратов частных производных соответствующих функций по направляющим косинусам (например, для K_x – уравнение (7.83)).

Взяв частные производные и выполнив необходимые преобразования, получим следующие значения коэффициентов для случая привязки к первому фазовому пеленгатору:

$$W_x = \frac{\sqrt{x^2 \left\{ R^6 + D^2 \left[r^2 + (z - B)z \right]^2 \right\} + r^4 B^2 D^2}}{B^2 r^2};$$

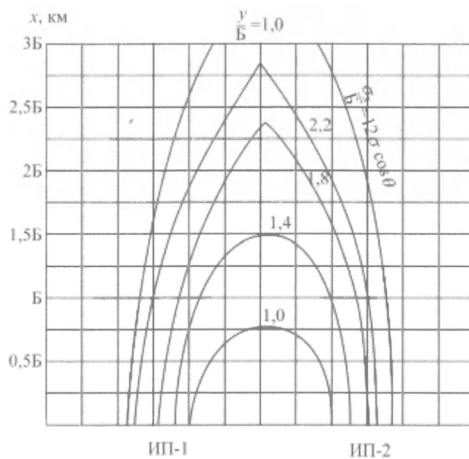
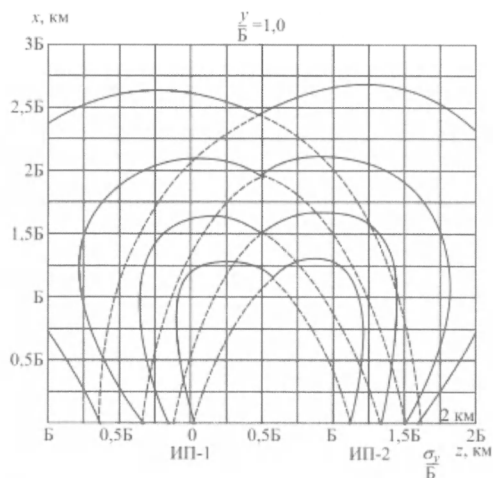
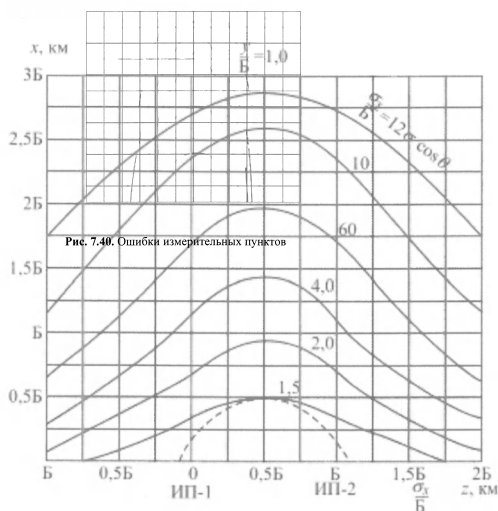
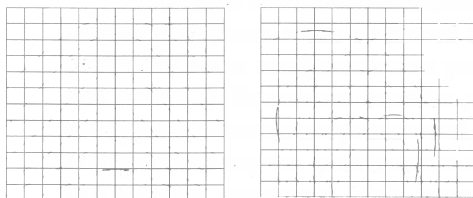
$$W_y = \frac{\sqrt{y^2 \left\{ R^6 - D^2 \left[R^2 + Bz \left(\frac{x}{y} \right)^2 \right]^2 \right\} + r^4 B^2 D^2 \left(\frac{x}{y} \right)^2}}{B^2 r^2}; \quad (7.85)$$

$$W_z = \frac{\sqrt{D^6 (x - B)^2 + R^6 z^2}}{B^2 r^2},$$

где

$$r^2 = x^2 + y^2; \quad D^2 = x^2 + y^2 + z^2; \quad R^2 = x^2 + y^2 + (z - B)^2.$$

Задаваясь соответствующими значениями x , y и z в системе уравнений (7.21), можно построить зоны точности пеленгационного метода. Для формул прямой засечки эти зоны изображены на рис. 7.40 (зоны точности приведены только для одной высоты). Величины ошибок даны в относительных единицах любых значений инструментальных погрешностей, что позволяет в практике определять результаты конкретного случая размещения и возможностей аппаратуры. Из рис. 7.40 видно, что ошибки нарастают более медленно вдоль оси x в полосе, равной примерно ширине базы (наименьшие величины ошибок – на линии между измерительными пунктами вдоль оси x).



Таким образом, наиболее выгодным расположением пунктов следует считать такое, при котором база (в данном случае ось z) располагается перпендикулярно директрисе полета объектов, а сама директриса проходит через середину базы.

Однако при использовании других пересчетных формул можно выделить другие направления, в которых ошибка также является минимальной, поэтому подробный анализ возможных точностей метода следует производить с учетом всех вариантов расчетных формул. Чтобы сравнить точности пеленгационного и лучевого методов, воспользуемся графиком рис. 7.41, где показана суммарная ошибка по трем координатам условной траектории, проходящей под углом 45° к горизонту перпендикулярно базе. Из графика видно, что применение пеленгационного метода дает наибольший выигрыш в точности на малых дальностях при малых базах между пунктами. Для больших наклонных дальностей применение пеленгационного метода нецелесообразно.

В ряде случаев реализация большой точности пеленгационного метода обеспечивается путем установки определенным образом нескольких измерительных пунктов вдоль трассы полета. Такой метод измерения называется *многопунктным*.

7.3.3. Дальномерный метод

Дальномерный метод измерения координат траектории заключается в одновременном измерении дальности с трех измерительных пунктов (рис. 7.42). Координаты

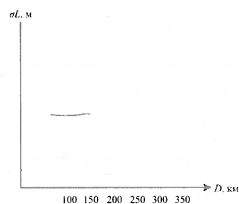


Рис. 7.41. Суммарная ошибка по трем координатам условной траектории

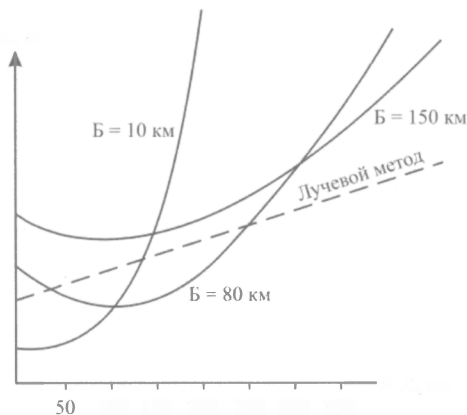
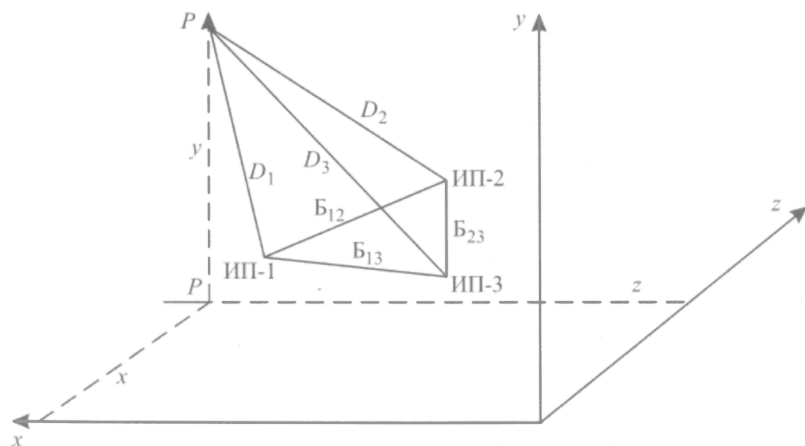


Рис. 7.42. Дальномерный метод точности



движущегося объекта определяются пересечением трех сфер с радиусами D_1, D_2, D_3 , а задача вычисления координат состоит в совместном решении системы трех сфер:

$$\begin{aligned}(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 &= D_1^2; \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 &= D_2^2; \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2 &= D_3^2,\end{aligned}\tag{7.86}$$

где $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3, z_1, z_2, z_3$ – координаты измерительных пунктов в единой системе с учетом кривизны Земли.

Чтобы упростить решение системы уравнений (7.86), вводим вспомогательные обозначения расстояний от точек стояния радиодальномеров до начала координат:

$$\begin{aligned}R_1 &= \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}; \\ R_2 &= \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}; \\ R_3 &= \sqrt{x_3^2 + y_3^2 + z_3^2},\end{aligned}\tag{7.87}$$

и расстояние от начала координат до объекта:

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.\tag{7.88}$$

Подставляя в уравнения (7.86) выражения (7.87) и (7.88), получаем систему уравнений

$$\begin{aligned}D_1^2 &= R_1^2 + \rho^2 - 2(x_1x + y_1y + z_1z); \\ D_2^2 &= R_2^2 + \rho^2 - 2(x_2x + y_2y + z_2z); \\ D_3^2 &= R_3^2 + \rho^2 - 2(x_3x + y_3y + z_3z).\end{aligned}\tag{7.89}$$

Преобразуя разности уравнений

$$D_1^2 - D_2^2, \quad D_1^2 - D_3^2 \quad \text{и} \quad D_2^2 - D_3^2,$$

находим

$$\begin{aligned}(x_1 - x_2)x + (y_1 - y_2)y + (z_1 - z_2)z &= C_1; \\ (x_1 - x_3)x + (y_1 - y_3)y + (z_1 - z_3)z &= C_2; \\ (x_2 - x_3)x + (y_2 - y_3)y + (z_2 - z_3)z &= C_3,\end{aligned}\tag{7.90}$$

где

$$\begin{aligned}2C_1 &= (D_2^2 - D_1^2) + (R_1^2 - R_2^2); \\ 2C_2 &= (D_3^2 - D_1^2) + (R_1^2 - R_3^2); \\ 2C_3 &= (D_3^2 - D_2^2) + (R_2^2 - R_3^2).\end{aligned}$$

Уравнения (7.90) являются системой обычных линейных уравнений с тремя неизвестными и могут быть решены любым из известных методов.

В практике часто пользуются решением, в котором координаты положения объекта на плоскости x, z выражаются через две координаты:

$$x = a_1 - b_1 y; \quad z = a_2 - b_2 y, \quad (7.91)$$

где

$$a_1 = \frac{C_1(z_2 - z_3) - C_3(z_1 - z_2)}{(x_1 - x_2)(z_2 - z_3) - (x_2 - x_3)(z_1 - z_2)};$$

$$a_2 = \frac{C_1(x_1 - x_3) - C_2(x_1 - x_2)}{(x_1 - x_3)(z_1 - z_2) - (x_1 - x_2)(z_1 - z_3)};$$

$$b_1 = \frac{(y_1 - y_2)(z_2 - z_3) - (y_2 - y_3)(z_1 - z_2)}{(x_1 - x_2)(z_2 - z_3) - (x_2 - x_3)(z_1 - z_2)};$$

$$b_2 = \frac{(y_1 - y_2)(x_1 - x_3) - (y_1 - y_3)(x_1 - x_2)}{(x_1 - x_3)(z_1 - z_2) - (x_1 - x_2)(z_1 - z_3)}.$$

Третья координата y может быть получена, если в одно из уравнений (7.85) подставить значения x и z из (7.91). При этом образуется квадратное уравнение

$$(b_1^2 + b_2^2 + 1)y^2 + 2(b_1 a_1 + b_2 a_2 - y_1 - a_1 b_1 - a_2 b_2)y + (a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 x_1 - 2a_2 z_1 - D_1^2) = 0,$$

из которого вычисляется значение y .

Решение уравнений (7.90) достаточно громоздко. Для анализа точности дальномерного метода рассмотрим случай размещения радиодальномеров на плоскости (рис. 7.43) с координатами ИП-1 $(0, 0, 0)$, ИП-2 $(x_2, 0, 0)$, ИП-3 $(0, 0, z_3)$. В этом случае координаты положения объекта определяются выражениями

$$x = -\frac{D_1^2 - D_2^2 + x_2^2}{2x_2}; \quad z = \frac{D_1^2 - D_3^2 + z_3^2}{2z_3}; \quad (7.92)$$

$$y = \sqrt{D_j^2 - (x - x_j)^2 - (z - z_j)^2},$$

где j – один из номеров измерительных пунктов.

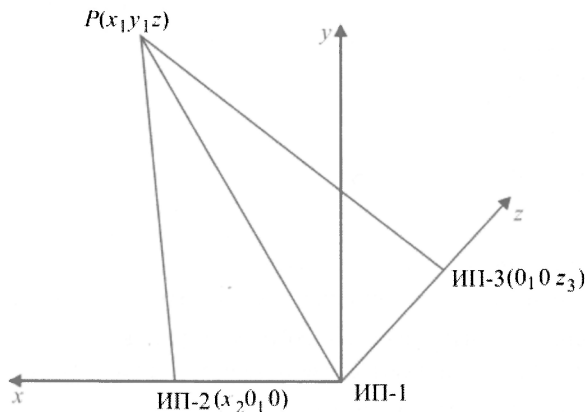


Рис. 7.43. Триангуляционный метод точности

Воспользовавшись правилом (7.4), определяем ошибки измерения координат, полагая, что $\sigma D_1 = \sigma D_2 = \sigma D_3 = \sigma D$:

$$\begin{aligned}\sigma x &= \sigma D \frac{\sqrt{D_1^2 + D_2^2}}{x_2} = \sigma D W_x; \\ \sigma z &= \sigma D \frac{\sqrt{D_1^2 + D_3^2}}{z_3} = \sigma D W_z; \\ \sigma y &= \frac{1}{y} \sqrt{D_j^2 \sigma D^2 + (x - x_j)^2 \sigma x^2 + (z - z_j)^2 \sigma z^2} = \frac{\sigma D}{y} W_y,\end{aligned}\quad (7.93)$$

где $j=1, 2$ или 3 .

Из третьего уравнения системы (7.93) следует, что

$$\left[D_j^2 \sigma D^2 + (x - x_j)^2 \sigma x^2 + (z - z_j)^2 \sigma z^2 \right] \geq 0,$$

где $j=1, 2$ или 3 .

Равенство нулю будет иметь место только при одновременном равенстве нулю каждого из слагаемых, а это возможно либо при

$$\sigma D = \sigma x = \sigma z = 0,$$

либо при

$$D_j = (x - x_j)(z - z_j) = 0.$$

Оба условия на испытаниях объектов нереальны. Следует считать, что

$$D_j^2 \sigma D^2 + (x - x_j)^2 \sigma x^2 + (z - z_j)^2 \sigma z^2 > 0,$$

где $j=1, 2$ или 3 .

После подстановки в третье уравнение системы (7.29) значений σx и σz из двух других уравнений получаем:

$$\begin{aligned}\sigma y &= \frac{1}{y} \sqrt{D_j^2 + \frac{(D_1^2 + D_2^2)(x - x_j)^2}{x_2^2} + \frac{(D_1^2 + D_3^2)(z - z_j)^2}{z_3^2}}; \\ \sigma x &= \sigma D \frac{\sqrt{D_1^2 + D_2^2}}{x_2}; \\ \sigma z &= \sigma D \frac{\sqrt{D_1^2 + D_3^2}}{z_3}.\end{aligned}\quad (7.94)$$

Из анализа уравнения (7.94) видим, что:

ошибка σy возрастает с уменьшением высоты, увеличением дальности до объекта и уменьшением размеров базового треугольника;

ошибки σx и σz возрастают с увеличением дальности до объекта и уменьшением размеров базового треугольника;

ошибки σx и σz не зависят от высоты полета объекта.

На рис. 7.44 представлены зависимости суммарной ошибки дальномерного и лучевого методов для условной прямолинейной траектории под углом 45° из центра базового треугольника.

Из сказанного можно сделать заключение, что применение дальномерного метода нецелесообразно для испытания объектов, летящих на малых и средних высотах, так как обладая сравнительно большой ошибкой по высоте, метод в то же время требует большого числа измерительных средств в сравнении с пеленгационным и лучевым методами.

На испытаниях космических объектов дальномерный метод может давать точности большие, чем лучевой и пеленгационный методы, когда размеры базового треугольника большей дальностей до объектов. При этом и зоны приемлемых точностей значительно возрастают по сравнению с лучевым и пеленгационным методами.

7.3.4. Разностно-дальномерный метод

Сущность разностно-дальномерного метода заключается в измерении разности дальностей от объекта измерения до двух измерительных пунктов ($D_1 - D_2$).

Известно, что геометрическим местом точек, для которых разность расстояний до двух заданных в пространстве пунктов есть величина постоянная, является гиперболоид вращения. Для определения положения точки в пространстве необходимо пересечение по крайней мере трех гиперболоидов, поэтому нужна фиксация одновременно трех разностей дальностей до объекта. Рассмотрим один из возможных вариантов построения разностно-дальномерной системы, где используется один ведущий измерительный пункт ИП-0 и три ведомых измерительных пункта ИП-1, ИП-2, ИП-3 (рис. 7.45). Пользуясь принятыми обозначениями, определим разности дальностей, измеряемые в системе

$$\Delta D_1 = \rho - D_1; \Delta D_2 = \rho - D_2; \Delta D_3 = \rho - D_3.$$

Подставив значения D_j в соответствующие уравнения (7.88), получим

$$\begin{aligned} x_1 x + y_1 y + z_1 z - \Delta D_1 \rho &= \frac{1}{2}(R_1^2 - \Delta D_1^2); \\ x_2 x + y_2 y + z_2 z - \Delta D_2 \rho &= \frac{1}{2}(R_2^2 - \Delta D_2^2); \\ x_3 x + y_3 y + z_3 z - \Delta D_3 \rho &= \frac{1}{2}(R_3^2 - \Delta D_3^2). \end{aligned} \quad (7.95)$$

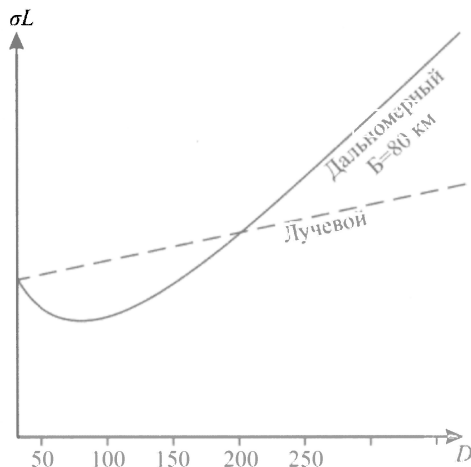


Рис. 7.44. Суммарные ошибки дальномерного и лучевого методов

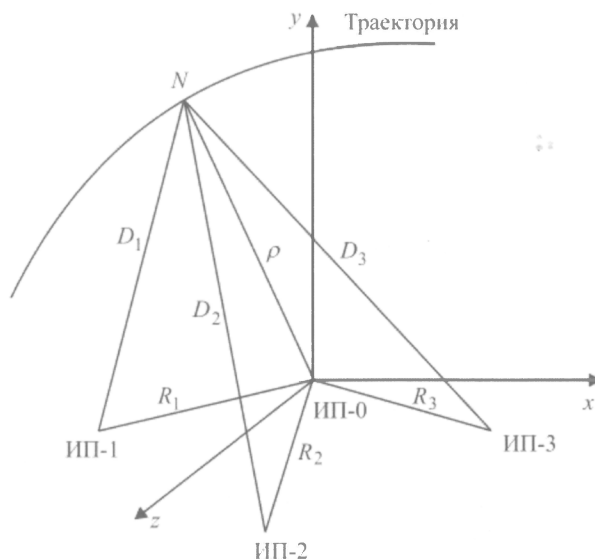


Рис. 7.45. Структура разностно-дальномерной системы

В трех уравнениях системы (7.95) четыре неизвестных – x, y, z, ρ . Для их нахождения добавим четвертое уравнение (7.87):

$$x^2 + y^2 + z^2 = \rho^2.$$

Решая совместно уравнения (7.95) и (7.87), находим значения координат объекта.

Частными решениями (для случая расположения всех станций на плоскости xOz) являются выражения

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{A} [\Delta D_1 (z_2 f_3 - z_3 f_2) + \Delta D_2 (z_3 f_1 - z_1 f_3) + \Delta D_3 (z_1 f_2 - z_2 f_1)]; \\ z &= \frac{1}{A} [\Delta D_1 (x_3 f_2 - x_2 f_3) + \Delta D_2 (x_1 f_3 - x_3 f_1) + \Delta D_3 (x_2 f_1 - x_1 f_2)]; \\ \rho &= \frac{1}{A} [f_1 (x_2 z_3 - x_3 z_2) + f_2 (x_3 z_1 - x_1 z_3) + f_3 (x_1 z_2 - x_2 z_1)]; \\ y &= \sqrt{\rho^2 - x^2 - z^2}, \end{aligned} \quad (7.96)$$

где

$$\begin{aligned} A &= \Delta D_1 (x_3 z_2 - x_2 z_3) + \Delta D_2 (x_1 z_3 - x_3 z_1) + \Delta D_3 (x_2 z_1 - x_1 z_2); \\ f_j &= \frac{1}{2} (R_j^2 - \Delta D_j^2); \quad j = 1, 2, 3. \end{aligned}$$

Анализ системы уравнений (7.96) показывает, что ошибки измерений координаты y (особенно при полетах на малых высотах) довольно значительные, в то время как координаты x и z определяются сравнительно точно.

Измерение разности дальностей требует специальной аппаратуры, использующей временные, частотные или фазовые методы измерения. В этом случае могут применяться достаточно низкие несущие частоты, когда электромагнитные волны огибают поверхность Земли. Это обстоятельство создает определенные преимущества разностно-дальномерному методу перед другими методами, использующими радиолокаторы и фазовые пеленгаторы, которые не могут работать под малыми углами места. Следовательно, разностно-дальномерный метод можно применять при измерениях координат объектов, летящих на самых малых высотах.

Так как разностно-дальномерная система измеряет высоту с большими ошибками, для ее измерения должна применяться другая аппаратура, например высотомер малых высот, помещенный на испытываемом объекте с передачей результатов измерения методами радиотелеметрии. Для измерения только двух координат (x и z) достаточно иметь только два уравнения из системы (7.30) и одно уравнение для измерения величины ρ :

$$x_1x + y_1y + z_1z - \Delta D_1 \rho = \frac{1}{2}(R_1^2 - \Delta D_1^2);$$

$$x_2x + y_2y + z_2z - \Delta D_2 \rho = \frac{1}{2}(R_2^2 - \Delta D_2^2);$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - \rho^2 = 0.$$

Значения y подставляются по данным радиовысотомера.

Поскольку радиоволны огибают поверхность Земли, при решении уравнений можно считать Землю плоской.

Точность определения координат зависит от угла, под которым пересекаются поверхности положения – гиперболоиды (в плоскости – линии гипербол). Чем ближе угол к 90° , тем точность выше. Это следует иметь в виду при выборе точек стояния измерительных средств относительно трассы полета испытываемых объектов.

7.4. Методы измерения скорости

Знание скорости движущихся объектов при внешнетраекторных измерениях необходимо для прогнозирования пространственно-временного положения траекторий космических аппаратов и места падения баллистических ракет, для определения параметров взаимного положения, а также для решения ряда других задач.

Развитие ракетной техники вызвало возрастание требований к точности измерения скорости, что в свою очередь потребовало разработки новых методов и совершенствования аппаратуры измерения скорости. Рассмотрим несколько методов, используемых в практике внешнетраекторных измерений.

7.4.1. Метод численного дифференцирования

Метод численного дифференцирования является одним из наиболее простых методов определения скорости изменения параметров траектории. Он обладает малой точностью и в настоящее время применяется сравнительно редко.

Если известны координаты траектории в соответствующие моменты времени:

$$t_1, t_2, t_3, \dots, t_n;$$

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n;$$

$$y_1, y_2, y_3, \dots, y_n;$$

$$z_1, z_2, z_3, \dots, z_n,$$

то скорость изменения координат траектории может быть вычислена методом численного дифференцирования. Для этого вычисляются производные

$$\begin{aligned}\dot{x}_k &= \frac{x_{k+1} - x_{k-1}}{2\Delta t}; \\ \dot{y}_k &= \frac{y_{k+1} - y_{k-1}}{2\Delta t}; \\ \dot{z}_k &= \frac{z_{k+1} - z_{k-1}}{2\Delta t},\end{aligned}\tag{7.97}$$

где $x_{k+1}, x_{k-1}, y_{k+1}, y_{k-1}, z_{k+1}, z_{k-1}$ — значения измеряемого параметра в точках $k+1$ и $k-1$ соответственно; $\dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{z}_k$ — значения составляющих скорости в точке k ; Δt — шаг дифференцирования.

Общее значение скорости находится с помощью очевидного соотношения

$$V_k = \sqrt{x_k^2 + y_k^2 + z_k^2}.$$

Считая $\dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{z}_k$ функциями соответствующих параметров (7.97), с помощью выведенного правила (7.68) получаем значение средних квадратических ошибок вычисления скорости

$$\begin{aligned}\sigma \dot{x} &= \frac{\sigma x}{\sqrt{2} \Delta t}; \\ \sigma \dot{y} &= \frac{\sigma y}{\sqrt{2} \Delta t}; \\ \sigma \dot{z} &= \frac{\sigma z}{\sqrt{2} \Delta t}.\end{aligned}\tag{7.98}$$

Как видно из выражения (7.98), ошибка определения скорости обратно пропорциональна величине шага дифференцирования, увеличение которого уменьшает влияние случайных ошибок определения координат. Вместе с тем это может вызвать появление систематических ошибок, если параметр изменяется нелинейно.

Так как в практике почти всегда приходится иметь дело с криволинейными законами изменения параметров, то метод дифференцирования не дает требуемой точности. При использовании его для каждого закона изменения параметров находят оптимальный шаг, дающий минимальную суммарную ошибку.

Более точной разновидностью метода дифференцирования является метод нахождения производной от аппроксимирующей функции изменения координат во времени. В нем табличные значения координат сглаживаются и аппроксимируются функциями, которые затем дифференцируются для определения составляющих вектора скорости.

7.4.2. Однопунктный метод

Однопунктный метод позволяет измерять скорость движущегося объекта из одного измерительного пункта, в который входят: радиодальномер, фазовый пеленгатор и измеритель боковых компонент скорости (рис. 7.46). При этом измеряются следующие параметры:

наклонная дальность D ;
направляющие косинусы K_x и K_z ;
производные от направляющих косинусов $\dot{K}_x$ и $\dot{K}_z$.

Координаты местоположения объекта связаны с дальностью и направляющими косинусами известными соотношениями:

$$x = D \cos \theta_x = D K_x;$$

$$y = D K_y;$$

$$z = D K_z.$$

Взяв от них производные, получаем систему уравнений, определяющих составляющие полного вектора скорости:

$$\dot{x} = D\dot{K}_x + \dot{D}K_x; \quad \dot{y} = D\dot{K}_y + \dot{D}K_y; \quad \dot{z} = D\dot{K}_z + \dot{D}K_z. \quad (7.99)$$

Полная скорость движущегося объекта может быть вычислена по формуле

$$V = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}.$$

Для измерения скорости лучевым методом измерительный пункт указанного ранее состава выдает все параметры кроме параметра D ; так как пока нет аппаратуры, которая измеряла бы этот параметр с требуемой точностью. Поэтому параметр $\dot{D}$ получают методом численного дифференцирования:

$$\dot{D}_k = \frac{D_{k+1} - D_{k-1}}{2\Delta t}.$$

Заметим, что точность вычисления $\dot{D}_k$ в общем случае будет зависеть от точности вычисления $\dot{x}$, $\dot{y}$, $\dot{z}$ полученных тем же методом, так как используется только один первичный параметр, в то время как для определения x , y , z , а следовательно

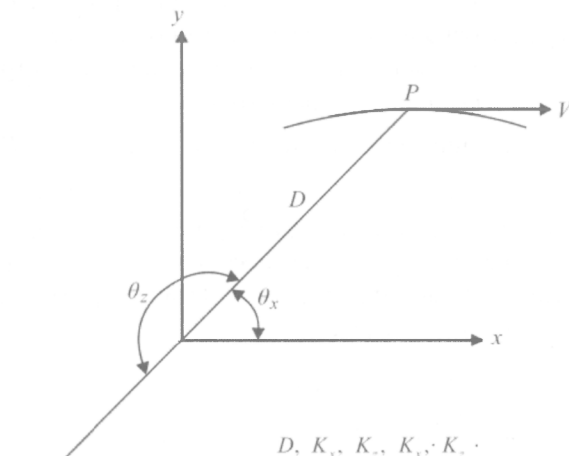


Рис. 7.46. Однопунктный метод

но, и $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$, используются кроме дальности и направляющие косинусы, вносящие в параметры $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ свою долю ошибки.

7.4.3. Двухпунктные методы

Существует несколько разновидностей двухпунктных методов измерения скорости, которые определяются составом измерительной аппаратуры на пунктах измерения. Как по точности, так и по экономическим затратам эти методы отличаются друг от друга. Рассмотрим два из них, получивших распространение в практике внешнетраекторных измерений.

Пеленгационный метод. Пеленгационный метод требует размещения на обоих измерительных пунктах радиодальномера, фазового пеленгатора и измерителя боковых компонент скорости (рис. 7.49).

При этом измеряются следующие параметры:

- 1) наклонные дальности D_1, D_2 ;
- 2) направляющие косинусы $K_{x1}, K_{x2}, K_{z1}, K_{z2}$;
- 3) производные от направляющих косинусов $\dot{K}_{x1}, \dot{K}_{x2}, \dot{K}_{z1}, \dot{K}_{z2}$.

Для решения задачи предположим вначале, что Земля плоская. Тогда составляющие скорости движущегося объекта при привязке к первому измерительному пункту связаны с измеряемыми параметрами выражениями

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \dot{D}_1 K_{x1} + D_1 \dot{K}_{x1}; \\ \dot{y} &= \dot{D}_1 K_{y1} + D_1 \dot{K}_{y1}; \\ \dot{z} &= \dot{D}_1 K_{z1} + D_1 \dot{K}_{z1}.\end{aligned}\tag{7.100}$$

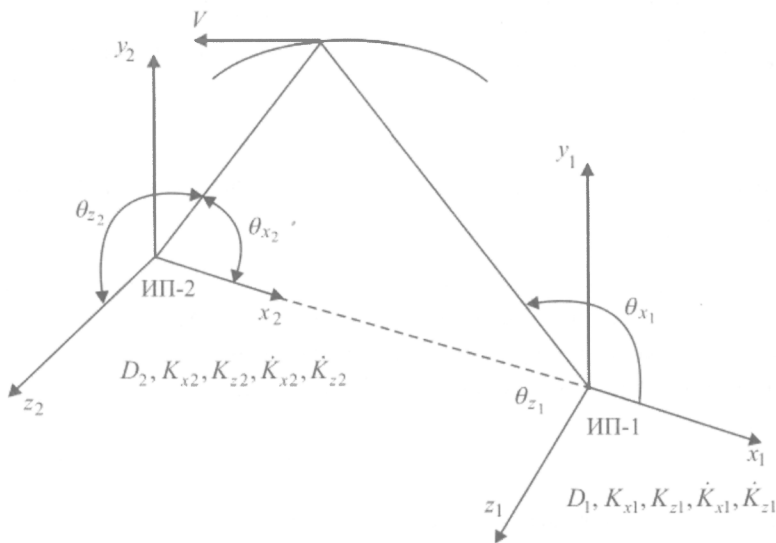


Рис. 7.47. Пеленгационный метод

Измерительные пункты не определяют $\dot{D}$, поэтому этот параметр необходимо исключить из уравнений за счет измерения параметров второго пункта. Для этого продифференцируем уравнение

$$\dot{D}^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2$$

и получим

$$D \dot{D} = x \dot{x} + y \dot{y} + z \dot{z}.$$

После преобразований находим

$$\dot{D} = K_x \dot{x} + K_y \dot{y} + K_z \dot{z}. \quad (7.101)$$

Подставив в первое и третье уравнения системы (7.100) значения D_1 из выражения (7.101), получим

$$\begin{aligned} (1 - K_{x1}^2) \dot{x} - K_{x1} K_{y1} \dot{y} - K_{x1} K_{z1} \dot{z} &= \dot{K}_{x1} D_1; \\ -K_{x1} K_{z1} \dot{x} - K_{y1} K_{z1} \dot{y} - (1 - K_{z1}^2) \dot{z} &= \dot{K}_{z1} D_1. \end{aligned} \quad (7.102)$$

Второе уравнение системы (7.100) принимать во внимание нельзя, так как оно является производным от двух других (K_y – фазовый пеленгатор).

Составляющие $\dot{x}$, $\dot{y}$ и $\dot{z}$ можно определить и со второго пункта. Рассуждая аналогично, для плоской Земли получим

$$\begin{aligned} (1 - K_{x2}^2) \dot{x} - K_{x2} K_{y2} \dot{y} - K_{x2} K_{z2} \dot{z} &= \dot{K}_{x2} D_2; \\ -K_{x2} K_{z2} \dot{x} - K_{y2} K_{z2} \dot{y} - (1 - K_{z2}^2) \dot{z} &= \dot{K}_{z2} D_2. \end{aligned} \quad (7.103)$$

Теперь имеем систему уравнений для определения составляющих вектора скорости $\dot{x}$, $\dot{y}$, $\dot{z}$:

$$\begin{aligned} (1 - K_{x1}^2) \dot{x} - K_{x1} K_{y1} \dot{y} - K_{x1} K_{z1} \dot{z} &= \dot{K}_{x1} D_1; \\ -K_{x1} K_{z1} \dot{x} - K_{y1} K_{z1} \dot{y} - (1 - K_{z1}^2) \dot{z} &= \dot{K}_{z1} D_1; \\ (1 - K_{x2}^2) \dot{x} - K_{x2} K_{y2} \dot{y} - K_{x2} K_{z2} \dot{z} &= \dot{K}_{x2} D_2; \\ -K_{x2} K_{z2} \dot{x} - K_{y2} K_{z2} \dot{y} - (1 - K_{z2}^2) \dot{z} &= \dot{K}_{z2} D_2. \end{aligned} \quad (7.104)$$

Как известно, для определения трех составляющих вектора скорости достаточно иметь три уравнения, поэтому возможно четыре сочетания по три уравнения для определения составляющих. Вычисления $\dot{x}$, $\dot{y}$, $\dot{z}$ для нескольких сочетаний и затем усреднение их с помощью весовых коэффициентов позволяют повысить точность измерения составляющих.

Модуль вектора скорости вычисляется по формуле

$$V = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}.$$

В реальных условиях необходимо учитывать кривизну земной поверхности. В этом случае одностая система координат измерительного пункта произвольно ориентирована относительно другой системы (рис. 7.48). Решение задачи необходимо вести в одной системе, например, системе координат первого пункта.

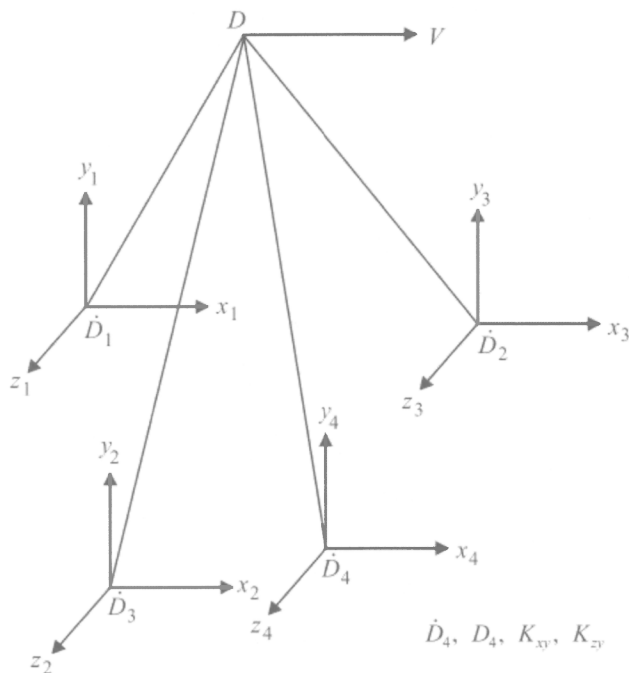


Рис. 7.48. Одностая система координат измерительного пункта

Составляющие скорости объекта, измеряемые с помощью второго пункта, в местной системе координат имеют вид

$$\begin{aligned}\dot{x}' &= \dot{D}_2 K_{x2} + \dot{K}_{x2} D_2; \\ \dot{y}' &= \dot{D}_2 K_{y2} + \dot{K}_{y2} D_2; \\ \dot{z}' &= \dot{D}_2 K_{z2} + \dot{K}_{z2} D_2.\end{aligned}\tag{7.105}$$

Выразим параметры $\dot{x}'$, $\dot{y}'$, $\dot{z}'$ в системе координат первого пункта, для чего воспользуемся известными уравнениями, выражающими координаты одной системы через другую:

$$\begin{aligned}x' &= (x - x_0) K_{x'x} + (y - y_0) K_{x'y} + (z - z_0) K_{x'z}; \\ y' &= (x - x_0) K_{y'x} + (y - y_0) K_{y'y} + (z - z_0) K_{y'z}; \\ z' &= (x - x_0) K_{z'x} + (y - y_0) K_{z'y} + (z - z_0) K_{z'z},\end{aligned}\tag{7.106}$$

где x_0, y_0, z_0 – координаты второй системы в первой системе координат; $K_{x'x}, K_{y'x}$ – направляющие косинусы между соответствующими осями координат.

Продифференцируем уравнения системы (7.106), имея в виду, что $K_{x'x}, K_{y'y}$ и др. являются постоянными величинами:

$$\begin{aligned}\dot{x}' &= \dot{x} K_{x'x} + \dot{y} K_{x'y} + \dot{z} K_{x'z}; \\ \dot{y}' &= \dot{x} K_{y'x} + \dot{y} K_{y'y} + \dot{z} K_{y'z}; \\ \dot{z}' &= \dot{x} K_{z'x} + \dot{y} K_{z'y} + \dot{z} K_{z'z}.\end{aligned}\quad (7.107)$$

Приравняв правые части первых уравнений систем (7.105) и (7.107) и подставив значения $\dot{D}_2$ из выражения (7.101), после преобразования найдем:

$$\begin{aligned}\dot{x}(K_{x'x} - K_{x2}^2) + \dot{y}(K_{x'y} - K_{x2}K_{y2}) + \dot{z}(K_{x'z} - K_{x2}K_{z2}) &= \dot{K}_{x2} D_2; \\ \dot{x}(K_{z'x} - K_{x2}K_{z2}) + \dot{y}(K_{z'y} - K_{y2}K_{z2}) + \dot{z}(K_{z'z} - K_{z2}^2) &= \dot{K}_{z2} D_2.\end{aligned}\quad (7.108)$$

При этом вторые уравнения указанных систем не использовались. Полученные уравнения (7.108) применялись вместо уравнений (7.103), не учитывающих влияния кривизны земной поверхности.

Так как уравнения для первого измерительного пункта остались без изменений, то система вычисления составляющих скорости теперь имеет вид

$$\begin{aligned}(1 - K_{x1}^2) \dot{x} - K_{x1} K_{y1} \dot{y} - K_{x1} K_{z1} \dot{z} &= \dot{K}_{x1} D_1; \\ -K_{x1} K_{z1} \dot{x} - K_{y1} K_{z1} \dot{y} - (1 - K_{z1}^2) \dot{z} &= \dot{K}_{z1} D_1; \\ (K_{x'x} - K_{x2}^2) \dot{x} + (K_{x'y} - K_{x2}K_{y2}) \dot{y} + (K_{x'z} - K_{x2}K_{z2}) \dot{z} &= \dot{K}_{x2} D_2; \\ (K_{z'x} - K_{x2}K_{z2}) \dot{x} + (K_{z'y} - K_{y2}K_{z2}) \dot{y} + (K_{z'z} - K_{z2}^2) \dot{z} &= \dot{K}_{z2} D_2.\end{aligned}\quad (7.109)$$

Значения направляющих косинусов между осями местных систем координат ($K_{x'x}, K_{y'y}$ и др.) вычисляются по методике, изложенной выше.

Комбинированный метод. Метод предполагает размещение на двух измерительных пунктах фазовых пеленгаторов, измерителей радиальной составляющей скорости и на одном из пунктов измерителя боковых компонент скорости и радиодальномера. При вычислении скорости комбинированным способом используются следующие параметры:

- наклонная дальность D_1 ;
- направляющие косинусы $K_{x1}, K_{x2}, K_{z1}, K_{z2}$;
- производные от направляющих косинусов $\dot{K}_{x1}, \dot{K}_{z1}$;
- радиальные составляющие скорости D_1, D_2 .

Как и в предыдущем случае, при привязке измерений к первому пункту получим

$$\begin{aligned}(1 - K_{x1}^2) \dot{x} - K_{x1} K_{y1} \dot{y} - K_{x1} K_{z1} \dot{z} &= \dot{K}_{x1} D_1; \\ -K_{x1} K_{z1} \dot{x} - K_{y1} K_{z1} \dot{y} - (1 - K_{z1}^2) \dot{z} &= \dot{K}_{z1} D_1.\end{aligned}\quad (7.110)$$

Так как измерение радиальной составляющей скорости с одного пункта дает большие ошибки из-за неустойчивости бортового генератора, то в качестве третьего уравнения системы (7.110) можно взять разность радиальных составляющих скорости, измеренных с двух пунктов. Неустойчивость бортового генератора при этом исключается:

$$\dot{D}_1 - \dot{D}_2 = (K_{x1} - K_{x2}) \dot{x} + (K_{y1} - K_{y2}) \dot{y} + (K_{z1} - K_{z2}) \dot{z}. \quad (7.111)$$

Теперь система уравнений для определения составляющих вектора скорости будет иметь вид

$$\begin{aligned} (1 - K_{x1}^2) \dot{x} - K_{x1} K_{y1} \dot{y} - K_{x1} K_{z1} \dot{z} &= \dot{K}_{x1} \dot{D}_1; \\ -K_{x1} K_{z1} \dot{x} - K_{y1} K_{z1} \dot{y} - (1 - K_{z1}^2) \dot{z} &= \dot{K}_{z1} \dot{D}_1; \\ (K_{x1} - K_{x2}) \dot{x} + (K_{y1} - K_{y2}) \dot{y} + (K_{z1} - K_{z2}) \dot{z} &= \dot{D}_1 - \dot{D}_2. \end{aligned} \quad (7.112)$$

Решая систему линейных уравнений (7.112) одним из существующих методов, можно вычислять составляющие скорости.

Для учета кривизны земной поверхности необходимо величину $\dot{D}_2$ выразить в системе координат первого пункта. С этой целью в выражение

$$\dot{D}_2 = K_{x2} \dot{x} + K_{y2} \dot{y} + K_{z2} \dot{z}$$

(см. (7.101)) подставим значения $\dot{x}', \dot{y}', \dot{z}'$ из уравнений (7.107). Приведя подобные члены, получим

$$\begin{aligned} \dot{D}_2 &= \dot{x}(K_{x2}K_{x'x} + K_{y2}K_{y'x} + K_{z2}K_{z'x}) + \dot{y}(K_{x2}K_{x'y} + K_{y2}K_{y'y} + \\ &+ K_{z2}K_{z'y}) + \dot{z}(K_{x2}K_{x'z} + K_{y2}K_{y'z} + K_{z2}K_{z'z}). \end{aligned} \quad (7.113)$$

Вычитая $\dot{D}_2$ из $\dot{D}_1$ (7.101), получим третье уравнение системы с учетом кривизны Земли:

$$\begin{aligned} \dot{D}_1 - \dot{D}_2 &= \dot{x}(K_{x1} - K_{x2}K_{x'x} + K_{y2}K_{y'x} + K_{z2}K_{z'x}) + \\ &+ \dot{y}(K_{y1} - K_{x2}K_{x'y} - K_{y2}K_{y'y} - K_{z2}K_{z'y}) + \\ &+ \dot{z}(K_{z1} - K_{x2}K_{x'z} - K_{y2}K_{y'z} - K_{z2}K_{z'z}). \end{aligned} \quad (7.114)$$

Полная система уравнений для решения задачи определения составляющих вектора скорости с учетом кривизны земной поверхности может быть записана в виде

$$\begin{aligned} (1 - K_{x1}^2) \dot{x} - K_{x1} K_{y1} \dot{y} - K_{x1} K_{z1} \dot{z} &= \dot{K}_{x1} \dot{D}_1; \\ -K_{x1} K_{z1} \dot{x} - K_{y1} K_{z1} \dot{y} - (1 - K_{z1}^2) \dot{z} &= \dot{K}_{z1} \dot{D}_1; \\ (K_{x1} - K^{(x)}) \dot{x} + (K_{y1} - K^{(y)}) \dot{y} + (K_{z1} - K^{(z)}) \dot{z} &= \dot{D}_1 - \dot{D}_2, \end{aligned} \quad (7.115)$$

где

$$K^{(x)} = K_{x2} K_{x'x} + K_{y2} K_{y'x} + K_{z2} K_{z'x};$$

$$K^{(y)} = K_{x2} K_{x'y} + K_{y2} K_{y'y} + K_{z2} K_{z'y};$$

$$K^{(z)} = K_{x2} K_{x'z} + K_{y2} K_{y'z} + K_{z2} K_{z'z}.$$

Значения направляющих косинусов между осями координат вычисляются по методике, изложенной в пп. 7.1.5.

7.4.4. Многопунктный беззапросный метод

Для получения полного вектора скорости достаточно иметь три значения векторов радиальной скорости. *Многопунктный беззапросный метод* предусматривает получение четырех значений векторов скорости с тем, чтобы частоту бортового генератора выразить через параметры, получаемые с четвертого приемного пункта.

Итак, имеем четыре измерительных пункта, принимающих излучение бортового генератора (находится на движущемся объекте), оборудованных аппаратурой измерения радиальной составляющей скорости (рис. 7.49). Один из этих пунктов должен иметь аппаратуру определения координат объекта в пространстве. Найдем уравнения вычисления вектора скорости для такой системы.

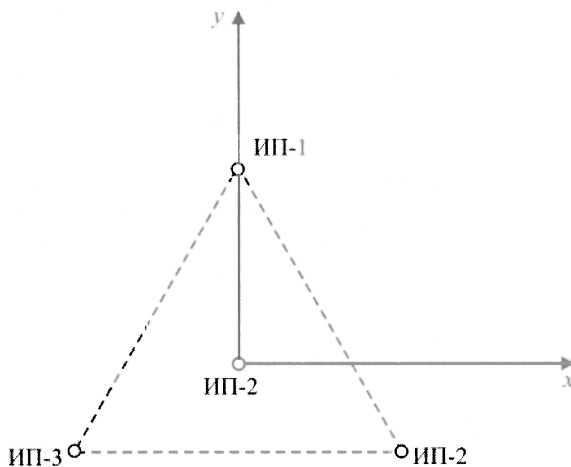


Рис. 7.49. Способ определения координат в пространстве

Если обозначить координаты измерительных пунктов в системе прямоугольных координат через x_{0i}, y_{0i}, z_{0i} , то расстояния до объекта от измерительных пунктов будут равны

$$D_i = K_{xi}(x - x_{0i}) + K_{yi}(y - y_{0i}) + K_{zi}(z - z_{0i}), \quad (7.116)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$.

Тогда скорость изменения дальностей

$$\dot{D}_i = K_{xi}\dot{x} + K_{yi}\dot{y} + K_{zi}\dot{z}, \quad (7.117)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$.

Однако скорость может быть выражена через частоту сигнала, принимаемого измерительными пунктами:

$$\dot{D}_i = C \left(1 - \frac{f_i}{f_0} \right), \quad (7.118)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$.

Приравняв уравнения (7.117) и (7.118), получим

$$C \left(1 - \frac{f_i}{f_0} \right) = K_{xi} \dot{x} + K_{yi} \dot{y} + K_{zi} \dot{z}, \quad (7.119)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$.

Используем одно из уравнений системы для исключения частот бортового генератора

$$f_0 = \frac{C f_4}{C - (K_{x4} \dot{x} + K_{y4} \dot{y} + K_{z4} \dot{z})}. \quad (7.120)$$

Значение f_0 подставим в три других уравнения системы. Тогда

$$\left(K_{xj} - \frac{f_j}{f_4} K_{x4} \right) \dot{x} + \left(K_{yj} - \frac{f_j}{f_4} K_{y4} \right) \dot{y} + \left(K_{zj} - \frac{f_j}{f_4} K_{z4} \right) \dot{z} = C \left(1 - \frac{f_j}{f_4} \right), \quad (7.121)$$

где $i = 1, 2, 3$.

Эти уравнения уже не зависят от частот бортового генератора, поэтому точность вычисления составляющих вектора скорости повышается.

Как и все системы линейных уравнений, уравнение (7.121) можно решить с помощью определителей по формулам Крамера:

$$\dot{x} = \frac{\Delta_x}{\Delta}; \quad \dot{y} = \frac{\Delta_y}{\Delta}; \quad \dot{z} = \frac{\Delta_z}{\Delta};$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} \left(K_{x1} - \frac{f_1}{f_4} K_{x4} \right) & \left(K_{y1} - \frac{f_1}{f_4} K_{y4} \right) & \left(K_{z1} - \frac{f_1}{f_4} K_{z4} \right) \\ \left(K_{x2} - \frac{f_2}{f_4} K_{x4} \right) & \left(K_{y2} - \frac{f_2}{f_4} K_{y4} \right) & \left(K_{z2} - \frac{f_2}{f_4} K_{z4} \right) \\ \left(K_{x3} - \frac{f_3}{f_4} K_{x4} \right) & \left(K_{y3} - \frac{f_3}{f_4} K_{y4} \right) & \left(K_{z3} - \frac{f_3}{f_4} K_{z4} \right) \end{vmatrix}$$

— определители систем уравнений (7.121); $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ — определители, полученные путем замены первого, второго или третьего столбцов определителя Δ столбцом свободных членов.

Измерение частот f_i на приемных пунктах удобнее заменить измерением отклонений этих частот от опорной частоты $f_{оп}$. Такая замена повышает точность измерения отклонений частот, но требует дополнительной аппаратуры, выдающей опорную частоту и системы синхронизации опорных частот.

В аппаратуре «Чайка», основанной на многопунктном методе, для этой цели используются линии синхронизации с аппаратурой «Шпага». Опорная частота получается в результате дробно-кратного преобразования частоты синхронизации, выдаваемой системой «Шпага»:

$$f_{оп} = n f_{син}.$$

Для повышения точности измерений малых отклонений частот с помощью дискретных счетчиков полученные отклонения $f_i - f_{\text{оп}}$ перед измерением умножаются в m раз. Таким образом, на каждом измерительном пункте регистрируется частота

$$F_i = m(f_i - n f_{\text{син}}), i = 1, 2, 3, 4. \quad (7.122)$$

Выразив значение f_i через значения F_i и $f_{\text{син}}$ и подставив их в уравнения (7.121), получим систему уравнений для измерения вектора скорости с помощью четырех измерительных пунктов, оборудованных аппаратурой «Чайка»:

$$\begin{aligned} [K_{xj} - K_{x4}L]\dot{x} + [K_{yj} - K_{y4}L]\dot{y} + [K_{zj} - K_{z4}L]\dot{z} &= \frac{C[F_4 - F_i]}{mnf_{\text{син}} + F_4}; \\ L &= \frac{mnf_{\text{син}} + F_j}{mnf_{\text{син}} + F_4}, j = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (7.123)$$

При хорошей точности рассмотренный метод обладает рядом недостатков: на каждом измерительном пункте необходимы специальные линии синхронизации и высокостабильные генераторы «Шпага»;

система состоит из четырех измерительных пунктов, оборудованных дорогостоящей аппаратурой и требующих больших средств на их эксплуатацию.

Все это делает многопунктную систему малорентабельной.

Краткая сравнительная характеристика методов измерения скорости.

Рассмотрение методов измерения скорости позволяет нам сделать вывод, что все они сильно отличаются друг от друга по числу используемой аппаратуры, а следовательно, и по экономическим затратам на их осуществление. Естественно, что выбор того или иного метода должен производиться как по точностным, так и по экономическим характеристикам. Однако сравнение методов измерения скорости с учетом экономических затрат является задачей достаточно сложной и выходящей за рамки настоящей книги, поэтому ограничимся только некоторыми выводами из анализа точностных характеристик.

Точность измерения составляющих вектора скорости может быть определена в общем виде по формулам

$$\begin{aligned} \sigma \dot{x} &= \sqrt{\sum \left(\frac{d\dot{x}}{d\alpha} \right)^2 \sigma_\alpha^2}; \\ \sigma \dot{y} &= \sqrt{\sum \left(\frac{d\dot{y}}{d\alpha} \right)^2 \sigma_\alpha^2}; \\ \sigma \dot{z} &= \sqrt{\sum \left(\frac{d\dot{z}}{d\alpha} \right)^2 \sigma_\alpha^2}, \end{aligned} \quad (7.124)$$

где σ_α – средние квадратические ошибки параметра α , принимающего значения первичных параметров, измеряемых в каждом методе.

Как показывает анализ, наиболее точным является многопунктный метод, требующий и наибольших экономических затрат. В этом случае оптимальным является размещение измерительных пунктов по вершинам и в центре равностороннего треугольника. При скорости $V = 7$ км/с, высоте полета $H = 300$ км и расположении объекта над ИП-4 среднеквадратическая ошибка измерения скорости этим методом составляет величину 0,7 – 1,4 м в зависимости от точности измерения F_i , а при расположении объекта над ИП-1 она уменьшается до 1,3 – 1,9 м/с.

К недостаткам метода относятся:

- необходимость создания сложных линий синхронизации между пунктами;
- большие экономические затраты;
- громоздкость системы;
- зависимость от точности синхронизации аппаратуры с помощью системы единого времени;
- наличие больших баз между пунктами для охвата необходимой длины траектории.

Эти недостатки привели к тому, что метод в практике не реализован.

Чтобы сравнить двухпунктный и однопунктный методы рассмотрим графики ошибок двухпунктного метода (рис. 7.50), которые составлены для суммарной ошибки

$$\sigma V = \sqrt{\sigma \dot{x}^2 + \sigma \dot{y}^2 + \sigma \dot{z}^2}$$

для случая, когда объект движется на высоте 150–200 км со скоростью $V_1 = 1$ км/с и $V_2 = 7$ км/с. Измерительные пункты расположены на расстоянии 400 км. Начало координат – в центре базы. Направление движения совпадает с направлением базы. При вычислении точности однопунктного метода предполагалось, что точность вы-

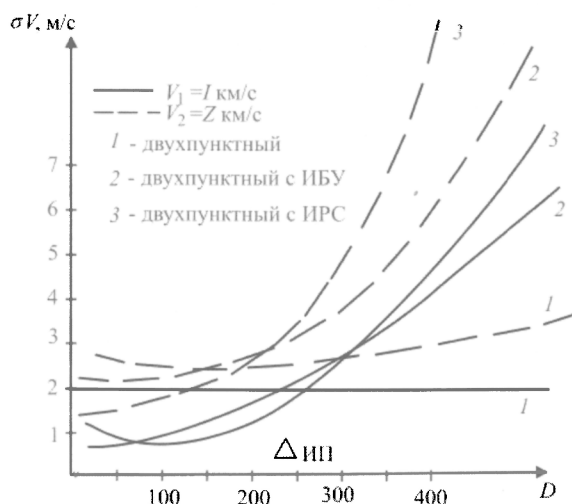


Рис. 7.50. Графики ошибок двухпунктного метода

числения $\dot{D}$ методом численного дифференцирования равна 2 м/с. Из графика видно, что:

с увеличением скорости ошибки возрастают;

точностные характеристики обоих двухпунктных методов примерно равноценны и использование того или иного из них зависит от наличия аппаратуры, достоверности информации и от других факторов;

точность двухпунктных методов достаточно высока, если объект движется между пунктами, и резко возрастает, когда объект выходит за пределы базы;

точность однопунктного метода мало изменяется с изменением скорости и дальности, поэтому в случае, когда не требуется высокой точности, этот метод целесообразно использовать.

Сравнение точностных характеристик и самих методов измерения скорости показывает, что на данном этапе измерение скорости является достаточно сложной и нерешенной до конца задачей, требующей большого числа аппаратуры, и потому экономически неэффективной.

Если для проведения испытаний можно расположить аппаратуру таким образом, чтобы ошибки соответствовали предъявленным требованиям, то для решения боевых задач эти методы мало пригодны.

Наиболее перспективным является однопунктный метод измерения, обеспечивающий измерения почти с одинаковой точностью на большой области пространства. Для его реализации необходима разработка новой аппаратуры, которая позволила бы заменить численный метод дифференцирования при определении более точными и оперативными методами.

7.5. Методы измерения параметров сближения объектов

На заключительном этапе летных испытаний производится экспериментальная оценка эффективности стрельбы испытываемой ракетной системы по характеристикам, обуславливающим поражение цели:

- 1) по параметрам взаимного положения ракеты и мишени;
- 2) по воздействию взрыва на мишень.

Первая задача решается методами внешнетраекторных измерений, а вторая задача либо по данным радиотелеметрической системы, либо путем осмотра остатков мишени.

Следует различать параметры взаимного положения на участке самонаведения ракеты и в районе встречи.

Параметры на участке самонаведения позволяют оценить эффективность головки самонаведения, а в районе встречи ракеты и мишени – эффективность всей системы в комплексе.

Основными параметрами на участке самонаведения являются:

- относительные координаты;
- расстояние между ракетой и мишенью;
- относительная скорость и ее составляющие;
- угловое положение мишени в зоне поиска головки самонаведения;
- угловая скорость вращения линии «ракета-мишень» (линии визирования).

В районе встречи (в пределах нескольких сотен метров) основными параметрами взаимного положения являются:

- относительные координаты;
- промах ракеты в момент взрыва боевого заряда;
- угол между продольной осью ракеты и направлением на мишень;
- угол между вектором относительной скорости и направлением на мишень;
- момент взрыва боевой части ракеты.

Для определения параметров взаимного положения могут применяться несколько методов зависимости от возможностей испытываемой системы, задач испытаний и используемой аппаратуры. Например, при использовании бортовой киносьемочной аппаратуры применяют *метод плановой съемки с самолета*, при котором определяются плоскостные относительные координаты за счет регистрации ракеты и мишени на одних кадрах пленки, и *метод киносьемки ракеты* несколькими киноаппаратами, установленными на мишени.

При использовании наземной аппаратуры применяются пеленгационный, лучевой и дальномерный методы измерения.

Наиболее распространенными в настоящее время являются методы измерения с помощью наземных измерительных средств: радиодальномеров, фазовых пеленгаторов и кинотелескопов.

Параметры взаимного положения могут определяться и с помощью специальной бортовой радиотехнической аппаратуры.

7.5.1. Однопунктный и пеленгационный методы

Взаимное положение объектов определяется в прямоугольной относительной системе координат как разность абсолютных координат ракеты и мишени:

$$\begin{aligned}\Delta x_i &= x_{im} - x_{ip}; \\ \Delta y_i &= y_{im} - y_{ip}; \\ \Delta z_i &= z_{im} - z_{ip},\end{aligned}\tag{7.125}$$

где $x_{ip}, y_{ip}, z_{ip}, x_{im}, y_{im}, z_{im}$ — координаты ракеты и мишени в системе координат i -го измерительного пункта; $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ — относительные координаты мишени и ракеты в той же системе координат.

Значения координат $x_{ip}, y_{ip}, z_{ip}, x_{im}, y_{im}, z_{im}$ могут быть вычислены любым из рассмотренных ранее методов: лучевым, пеленгационным или дальномерным с применением различных комбинаций измерительных средств. Однако точность вычисления

относительных координат при этом будет хуже в $\sqrt{2}$ по сравнению с точностью измерения абсолютных координат, так как суммируются ошибки измерения координат обоих объектов. Характер изменения ошибок с увеличением дальности — тот же, что для измерения абсолютных координат (рис. 7.51). Требуемая же точность выдачи относительных координат при испытаниях обычно выше, чем абсолютных координат.

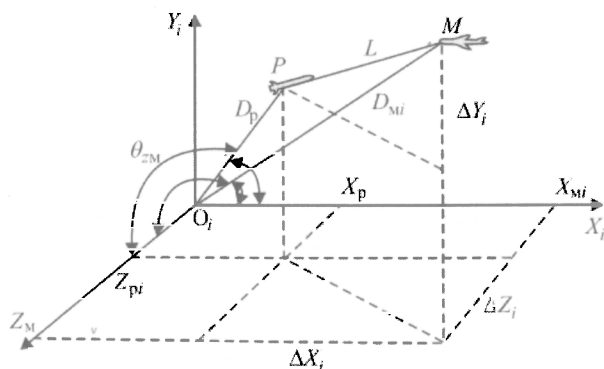


Рис. 7.51. Способ измерения абсолютных координат

Точность измерения относительных координат можно повысить, если измерять разности угловых координат до объектов с помощью оптической аппаратуры или разности направляющих косинусов и дальностей до двух объектов, как это предусмотрено в радиотехническом комплексе «Кубань». Увеличение точности получается за счет уменьшения или исключения ряда систематических ошибок, например ошибок, вызываемых рефракцией радиоволн, ошибок от задержки сигналов в радиоцепях, инструментальных ошибок оптической аппаратуры и т.д. Рассмотрим особенности вычисления относительных координат в этом случае.

Взяв за основу уравнение (7.125), выразим координаты объектов через направляющие косинусы:

$$\begin{aligned}\Delta x_i &= D_{mi} K_{xim} - D_{pi} K_{xip}; \\ \Delta y_i &= D_{mi} K_{yim} - D_{pi} K_{yip}; \\ \Delta z_i &= D_{mi} K_{zim} - D_{pi} K_{zip}.\end{aligned}\quad (7.126)$$

Если представить K_{xim} и другие направляющие косинусы как

$$K_{xim} = K_{xip} + \Delta K_{xi},$$

где ΔK_{xi} – разность направляющих косинусов, то выражения (7.126) можно переписать в виде

$$\begin{aligned}\Delta x &= K_{xp} \Delta D - D_m \Delta K_x; \\ \Delta y &= K_{yp} \Delta D - D_m \Delta K_y; \\ \Delta z &= K_{zp} \Delta D - D_m \Delta K_z,\end{aligned}\quad (7.127)$$

где $\Delta D = D_m - D_p$.

Воспользовавшись формулой

$$\sigma \Delta x = \sqrt{\sum \left(\frac{d\Delta x}{dx} \right)^2} \sigma^2 \alpha,$$

где α принимает значения всех параметров функциональной зависимости (7.3), найдем величину ошибки измерения относительной координаты Δx :

$$\sigma \Delta x = \sqrt{\Delta D^2 \sigma^2 (K_{xp}) + K_{xp}^2 \sigma^2 (\Delta D) + \Delta K_x^2 \sigma^2 (D_m) + D_m^2 \sigma^2 (\Delta K_x)}.$$

Примем ориентировочно, что

$$\sigma D \approx 2\sigma \Delta D; \quad \sigma K_x \approx 2\sigma \Delta K_x,\quad (7.128)$$

тогда

$$\sigma \Delta x = \sqrt{(4\Delta D^2 + D^2) \sigma^2 (K_x) + (4\Delta K_x^2 + K_x^2) \sigma^2 (\Delta D)}.$$

Так как $D^2 \gg 4\Delta D^2$, а $K_x^2 \gg 4\Delta K_x^2$, то, пренебрегая малыми членами, ориентировочно можно записать

$$\sigma(\Delta x) = \sqrt{D^2 \sigma^2(\Delta K_x) + K_x^2 \sigma^2(\Delta D)}. \quad (7.129)$$

Проделив аналогичные вычисления для одного из уравнений (7.126), получим

$$\sigma'(\Delta x) = \sqrt{2 \left[K_x^2 \sigma^2(D) + D^2 \sigma^2(\Delta K_x) \right]}.$$

Приняв условия (7.128), найдем, что

$$\sigma'(\Delta x) = \sqrt{8 \left[K_x^2 \sigma^2(D) + D^2 \sigma^2(\Delta K_x) \right]}. \quad (7.130)$$

Сравнивая уравнения (7.130) и (7.129), можно видеть, что точность вычислений по формулам (7.127) примерно в $\sqrt{8}$ раз выше точности вычисления относительных координат. Таким образом, непосредственное измерение разностных параметров ΔD и ΔK существенно повышает точность определения относительных координат.

Методы, в которых используются разностные параметры, в отличие от ранее рассмотренных, называются разностными, и различаются способом определения дальности до объектов: ракеты D_p и мишени D_m . Если эти дальности определены с помощью радиодальномеров, то метод называется *разностным лучевым*, если с помощью двух фазовых пеленгаторов или двух комплектов оптических средств, расположенных на двух разнесенных измерительных пунктах, то *разностным пеленгационным* методом.

При сравнении точности разностного лучевого метода измерения относительных координат двух объектов с лучевым методом определения абсолютных координат объекта, можно видеть, что точность измерения относительных координат будет примерно в два раза выше точности определения абсолютных координат. Пеленгационный метод с использованием разности направляющих косинусов также будет точнее пеленгационного метода измерения абсолютных координат.

Для сравнения рассмотрим частный случай пеленгационного метода – случай «прямой засечки». При этом в уравнении (7.127) величину ΔD выражают через направляющие косинусы i - и j -го измерительных пунктов.

Как известно из уравнений (7.80), дальность до одного из объектов выражается формулой

$$D_i = B \frac{\sin \mu_j}{\sin(\mu_j + \mu_i)}. \quad (7.131)$$

В то же время для формул «прямой засечки» углы μ_i и μ_j можно найти из условия (7.81):

$$\cos \mu_j = -K_{zj}; \quad \cos \mu_i = +K_{zi}. \quad (7.132)$$

Тогда дальности до объектов относительно начала координат i -го пункта можно представить в виде

$$D_{mi} = B \frac{\sqrt{1 - K_{zjm}^2}}{K_{zim} \sqrt{1 - K_{zjm}^2} - K_{zjm} \sqrt{1 - K_{zim}^2}}; \quad (7.133)$$

$$D_{pi} = B \frac{\sqrt{1 - K_{zjp}^2}}{K_{zip} \sqrt{1 - K_{zjp}^2} - K_{zjp} \sqrt{1 - K_{zip}^2}}. \quad (7.134)$$

Выразим значения направляющих косинусов мишени через разность направляющих косинусов $K_{zm} = K_{zp} + \Delta K_z$ для i - и j -го пунктов:

$$D_{mi} = B \frac{\sqrt{1 - (K_{zjp} + \Delta K_z)^2}}{(K_{zij} + \Delta K_z) \sqrt{1 - (K_{zjp} + \Delta K_z)^2} - (K_{zjp} + \Delta K_z) \sqrt{1 - (K_{zij} + \Delta K_z)^2}}. \quad (7.135)$$

Подставив значения D_{pi} и D_{mi} из (7.9) и (7.10) в систему уравнений (7.127), получим формулы для вычисления относительных координат разностным пеленгационным методом «прямой засечки»:

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= K_{xip} (D_{mi} - D_{pi}) + D_{mi} \Delta K_{xi}; \\ \Delta y_i &= K_{yip} (D_{mi} - D_{pi}) + D_{mi} \Delta K_{yi}; \\ \Delta z_i &= K_{zip} (D_{mi} - D_{pi}) + D_{mi} \Delta K_{zi}, \end{aligned} \quad (7.136)$$

где

$$\begin{aligned} D_{mi} &= B \frac{\sqrt{1 - (K_{zjp} + \Delta K_z)^2}}{(K_{zip} + \Delta K_z) \sqrt{1 - (K_{zjp} + \Delta K_z)^2} - (K_{zjp} + \Delta K_z) \sqrt{1 - (K_{zip} + \Delta K_z)^2}}; \\ D_{pi} &= B \frac{\sqrt{1 - K_{zjp}^2}}{K_{zij} \sqrt{1 - K_{zjp}^2} - K_{zip} \sqrt{1 - K_{zjp}^2}}. \end{aligned}$$

Средняя квадратическая ошибка измерения относительных координат (7.4) может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} \sigma \Delta x &= K_{\Delta x} \sigma \Delta K; \\ \sigma \Delta y &= K_{\Delta y} \sigma \Delta K; \\ \sigma \Delta z &= K_{\Delta z} \sigma \Delta K, \end{aligned} \quad (7.137)$$

где $K_{\Delta x}$, $K_{\Delta y}$, $K_{\Delta z}$ – коэффициенты, зависящие от местоположения объектов относительно измерительных пунктов; $\sigma \Delta K$ – ошибка в определении разности направляющих косинусов.

Для вычисления относительных координат разностным лучевым или пеленгационным методами часто используются оптические средства, позволяющие экспонировать на один кадр оба объекта. С помощью таких кадров легко вычислить разность угловых направлений на оба объекта и исключить тем самым ряд систематических ошибок оптических средств.

Разность угловых направлений измеряется обычно с помощью кинотелескопов, имеющих объективы с большими фокусными расстояниями, а следовательно, и большую точность определения разности углов. В то же время кинотелескопы имеют низкую точность измерения самих угловых координат и поэтому координаты измеряются кинотеодолитом, расположенным рядом с кинотелескопом. Таким образом, измерения производятся с помощью комплекта оптической аппаратуры, состоящей из кинотеодолита и кинотелескопа.

Вычисление относительных координат при использовании оптических средств производится по формулам

$$\begin{aligned}x_{ip} &= D_{ip} \cos \varepsilon_{ip} \cos \beta_{ip}; & x_{im} &= D_{im} \cos(\varepsilon_{ip} + \Delta \varepsilon_i) \cos(\beta_{ip} + \Delta \beta_i); \\y_{ip} &= D_{ip} \sin \varepsilon_{ip}; & \Delta \varepsilon y_{ip} &= D_{im} \sin(\varepsilon_{ip} + \Delta \varepsilon_i); \\z_{ip} &= D_{ip} \cos \varepsilon_{ip} \sin \beta_{ip}; & z_{ip} &= D_{im} \cos(\varepsilon_{ip} + \Delta \varepsilon_i) \sin(\beta_{ip} + \Delta \beta_i).\end{aligned}$$

Угловые отклонения мишени относительно ракеты определяются как разность угловых отклонений мишени и ракеты от визирной оси кинотелескопа:

$$\begin{aligned}\Delta \varepsilon_i &= \Delta \varepsilon_{im} - \Delta \varepsilon_{ip}; \\ \Delta \beta_i &= \Delta \beta_{im} - \Delta \beta_{ip}.\end{aligned}\tag{7.138}$$

В свою очередь, угловые отклонения объектов определяются путем пересчета линейных отклонений в угловые отклонения по известным формулам, принятым для кинотелескопов:

$$\begin{aligned}\Delta \varepsilon_{ip(m)} &= \arctg \left[\operatorname{tg} \left(\varepsilon_0 + \arctg \frac{l}{f} \right) \cos \Delta \beta_{ip(m)} \right] - \varepsilon_0; \\ \Delta \beta_{ip(m)} &= \arctg \frac{k \cos \left(\arctg \frac{l}{f} \right)}{f \cos \left(\varepsilon_0 + \arctg \frac{l}{f} \right)},\end{aligned}\tag{7.139}$$

где k и l – горизонтальное и вертикальное отклонения объектов от осей кадров пленки; f – фокусное расстояние объектива; ε_0 – угол места визирной оси визира кинотелескопа.

Точность определения разности углов зависит от фокусного расстояния объектива. Так, например, если средняя квадратическая ошибка определения угла в $\sigma \alpha = 30''$ находится в пределах рабочих углов СКТ-1, то

$$\sigma \Delta a = 20'' \text{ при } f = 600 \text{ мм};$$

$$\sigma \Delta a = 8'' \text{ при } f = 2400 \text{ мм}.$$

Метод определения относительных координат будет лучевым, если D_{ip} и D_{im} измеряются радиодальномерами, или пеленгационным, если эти параметры вычисляются по данным двух измерительных пунктов, оборудованных оптической или фазовой аппаратурой.

Полный анализ точности разностных методов показывает, что разностный пеленгационный метод дает точность выше, чем разностный лучевой метод, если объект находится между измерительными пунктами, и наоборот, точность разностного лучевого метода выше, если объект находится на больших удалениях от базы. Характер изменения ошибки с изменением дальности остается примерно тем же, что и ошибок измерения абсолютных координат.

При измерениях параметров взаимного положения часто пользуются модулем расстояния между объектами:

$$L = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}.$$

По результатам вычислений строят графическую зависимость (рис. 7.52), из которой находят величину пролета ракеты, соответствующую минимальному расстоянию между объектами, и величину «промаха» ракеты в момент подрыва боевой части ракеты.

7.5.2. Дальномерный метод

Для измерения относительных координат можно применить и дальномерный метод, который предполагает использование трех пунктов с двухканальными РЛС, измеряющими разность наклонных дальностей до объектов. Относительные координаты (как и в предыдущих случаях) получаются за счет решения уравнений

$$\Delta x = x_p - x_m; \Delta y = y_p - y_m; \Delta z = z_p - z_m.$$

Каждую из абсолютных координат объектов определяют путем решения системы уравнений (7.22) с учетом реального расположения измерительных пунктов. Например, при расположении измерительных пунктов на плоскости

$$\Delta x = \frac{(z_3 - z_2)(D_{1p} - D_{1m})\Delta D_1 + (z_1 - z_3)(D_{2p} - D_{2m})\Delta D_2 + (z_2 - z_1)(D_{3p} - D_{3m})\Delta D_3}{z_2 x_3 - x_2 z_3},$$

где z_1, z_2, z_3, x_2, x_3 , — координаты ИП; $\Delta D_2, \Delta D_2, D_3$ — разности дальностей до объектов от каждого ИП.

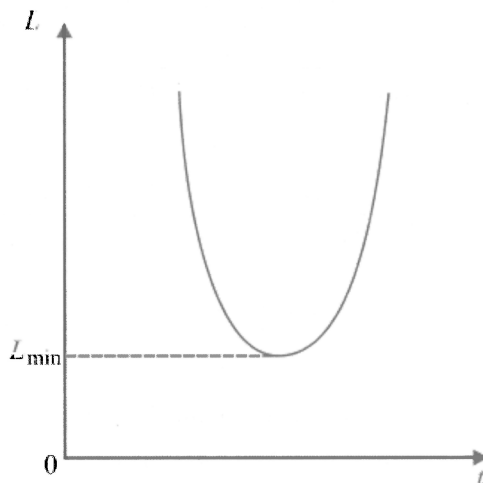


Рис. 7.52. График, иллюстрирующий поведение ракеты в полете

Если оценить погрешность известным методом и принять для приближенной оценки

$$\sigma \Delta D_1 = \sigma \Delta D_2 = \sigma \Delta D_3 = \sigma \Delta D ;$$

$$\sigma D_{1p} = \sigma D_{2p} = \sigma D_{3p} = \sigma D_{1m} = \sigma D_{2m} = \sigma D_{3m} ;$$

$$D_{1p} = D_{1m}, D_{2p} = D_{2m}, D_{3p} = D_{3m},$$

то

$$\sigma \Delta x = \sqrt{K_x^2 \sigma^2 \Delta D + C_x^2 \sigma D^2}, \quad (7.140)$$

где

$$C_x^2 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{[(z_3 - z_2) \Delta D_1]^2 + [(z_1 - z_3) \Delta D_2]^2 + [(z_2 - z_1) \Delta D_3]^2}{(z_2 x_3 - x_2 z_3)^2} \right\};$$

$$K_x^2 = \left\{ \frac{[(z_3 - z_2) D_1]^2 + [(z_1 - z_3) D_2]^2 + [(z_2 - z_1) D_3]^2}{(z_2 x_3 - x_2 z_3)^2} \right\}.$$

Из сравнения величин C_x и K_x видно, что при $\Delta D \ll D$ величина $C_x^2 \ll K_x^2$, тогда $\sigma \Delta x \cong K_x \sigma \Delta D$, и по аналогии

$$\sigma \Delta y \approx K_y \sigma \Delta D ;$$

$$\sigma \Delta z \approx K_z \sigma \Delta D .$$

Таким образом, и для разностного дальномерного метода определение относительных координат ошибки во столько же раз меньше ошибки абсолютных координат дальномерного метода, во сколько точность $\sigma \Delta D$ выше точности σD .

Иначе говоря, разностный дальномерный метод измерения относительных координат не имеет преимуществ перед разностным пеленгационным методом так же, как и дальномерный метод измерения абсолютных координат не имеет преимуществ перед обычным пеленгационным методом. В то же время метод требует значительно большего числа измерительной аппаратуры, и поэтому на практике в настоящее время его не используют.

Подводя итоги сравнения методов измерения относительных координат, можно сделать вывод, что при местонахождении объектов вблизи центра базовой линии необходимо применять разностный пеленгационный метод с использованием фазовой или оптической аппаратуры. При значительном удалении районов встречи от центра базовой линии необходимо применять разностный лучевой метод.

Точность определения относительных координат удовлетворяет требованиям внешнетраекторных измерений только при оптимальном размещении измерительных средств, что не всегда возможно обеспечить на практике, поэтому измерения взаимного положения лучше производить с помощью специальной бортовой аппаратуры.

В ряде случаев измерения необходимо производить в автономной системе ординат, связанной с положением одного из объектов. При этом система координат привязывается либо к продольной оси ракеты (рис. 7.53), либо к вектору относительной скорости (рис. 7.54).

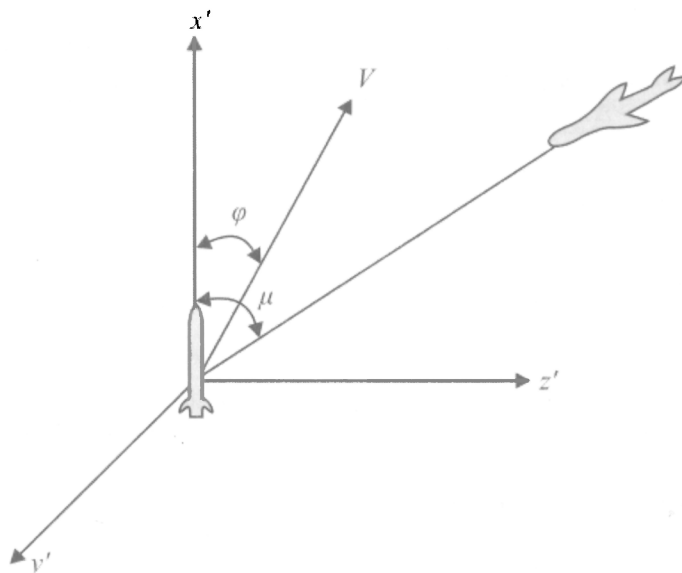


Рис. 7.53. Система координат при привязке к продольной оси координат

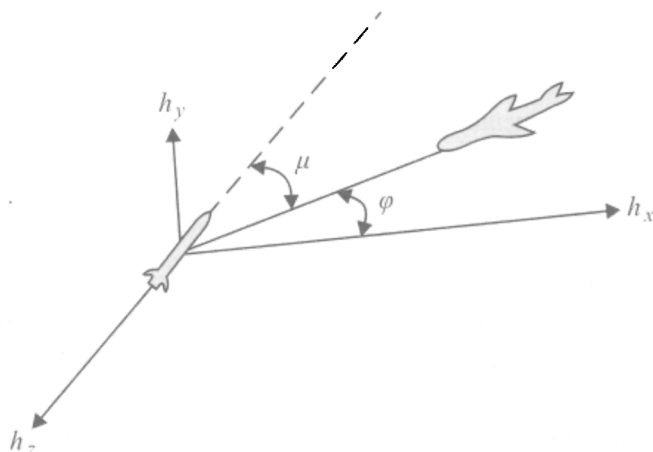


Рис. 7.54. Система координат при привязке к вектору относительной скорости ракеты

Пересчет относительных координат из прямоугольной наземной системы в связанную систему не представляет существенных трудностей, если известно положение ракеты в пространстве по данным радиотелеметрических измерений или положения вектора скорости по данным внешнетраекторных измерений.

7.5.3. Определение относительной скорости и угловых направлений

Относительная скорость сближения ракеты и мишени определяется по ее составляющим:

$$V_{\text{отн}} = \sqrt{V_{\text{отн } x}^2 + V_{\text{отн } y}^2 + V_{\text{отн } z}^2}. \quad (7.141)$$

Оставляющие скорости определяются методом численного дифференцирования относительных координат:

$$\begin{aligned} V_{\text{отн } x} &= \frac{\Delta x_{t1} - \Delta x_{t2}}{\Delta t}; \\ V_{\text{отн } y} &= \frac{\Delta y_{t1} - \Delta y_{t2}}{\Delta t}; \\ V_{\text{отн } z} &= \frac{\Delta z_{t1} - \Delta z_{t2}}{\Delta t}. \end{aligned} \quad (7.142)$$

где $\Delta t = t_2 - t_1$ – шаг дифференцирования.

Ошибка вычисления относительной скорости методом дифференцирования определяется выбором шага дифференцирования Δt и величиной ошибки относительных координат.

Основными угловыми направлениями являются:

угол встречи φ – угол между продольной осью ракеты и вектором относительной скорости (рис. 7.53 и 7.54);

угол визирования μ – угол между продольной осью ракеты и направлением на мишень (рис. 7.53 и 7.54).

Определение угловых направлений зависит от применяемых систем координат. Так, для прямоугольной наземной системы координат угол встречи φ можно определить на основе внешнетраекторных и радиотелеметрических измерений по формуле

$$\varphi = \arccos \frac{V_{\text{отн } x} \cos \varphi \cos \nu - V_{\text{отн } y} \sin \nu - V_{\text{отн } z} \sin \varphi \cos \nu}{V_{\text{отн}}}, \quad (7.143)$$

где φ и ν – истинные углы курса и тангажа, вычисляемые на основе радиотелеметрических измерений; угол визирования μ – с помощью уравнения

$$\mu = \arccos \frac{\Delta x \cos \varphi \cos \nu - \Delta y \sin \nu - \Delta z \sin \varphi \cos \nu}{L}. \quad (7.144)$$

Для координатной системы, связанной с продольной осью ракеты (рис. 7.51), угол встречи вычисляется по формуле

$$\varphi = \arccos \frac{V'_{\text{отн } x}}{V_{\text{отн}}},$$

где $V'_{\text{отн } x}$ – составляющая скорости в направлении продольной оси ракеты.

Угол визирования μ определяется по формуле

$$\mu = \arccos \frac{x'}{\sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2}},$$

где x' , y' , z' – относительные координаты мишени в связанной системе координат (см. рис. 7.53).

Анализ погрешностей измерения углов, проведенный в соответствии с принятой ранее методикой, показывает, что ошибки резко возрастают с уменьшением расстояния между объектами и при расстояниях, меньших 20 м. Они становятся настолько большими, что не удовлетворяют требованиям внешнетраекторных измерений, что говорит о необходимости использования автономной бортовой аппаратуры, например оптической аппаратуры, устанавливаемой на одном из объектов.

7.6. Статистические методы обработки траекторной информации

7.6.1. Метод наименьших квадратов

До настоящего времени в практических системах алгоритмической обработки траекторной измерительной информации в качестве математико-статистического метода обработки доминирующее положение занимал метод наименьших квадратов (МНК) в сочетаниях с различными способами отбраковки аномальных измерений или без них. Это объясняется рядом причин как теоретического, так и практического характера.

В качестве теоретического обоснования применения этого метода принимается центральная предельная теорема теории вероятностей, которая гласит, что при некоторых достаточно общих условиях, сумма большого числа независимых случайных величин распределена асимптотически нормально. Поскольку погрешности траекторных измерений обусловлены большим числом физических факторов, воздействующих на результат измерений независимо друг от друга, а эти погрешности в силу центральной предельной теоремы распределены по закону, близкому к нормальному, что и делает обоснованным применение МНК для обработки траекторных измерений. Часто, правда, среди нормальных измерений появляются в том или ином количестве так называемые аномальные (грубые, недостоверные) измерения, которые, если их включить в обработку, «уводят», смещают искомые оценки неизвестных параметров траектории. Однако с аномальными измерениями можно бороться с помощью их отбраковки. Для этих целей используются различные способы.

Метод наименьших квадратов прост и геометрически нагляден, что также способствует его популярности. Он удобен для реализации в практических задачах. В случае линейной зависимости оцениваемых параметров от обрабатываемых измерений определение наилучших оценок неизвестных параметров сводится к решению систем нормальных уравнений – линейных алгебраических систем, теория, методы и решения которых хорошо разработаны и общеизвестны. В случае же нелинейной зависимости оцениваемых параметров от обрабатываемых измерений процесс нахождения наилучших оценок усложняется, но и в этом случае имеется большое число разнообразных методов безусловной оптимизации, среди которых

обычно удается найти метод, позволяющий получить результат в той или иной конкретной задаче обработки траекторных измерений.

Наконец, вычислительная схема метода наименьших квадратов практически не связана с фактическим распределением случайных погрешностей измерений. Ее можно применять формально, не заботясь о применимости методов, не обоснованная выполняемые действия. И схемы почти всегда дают некоторый результат, который при не критическом к нему отношении, принимают за правильный.

Все эти обстоятельства и способствовали широкому внедрению метода наименьших квадратов в практику обработки траекторных измерений. Метод «исправно» работал до тех пор, пока требования к качеству обработки не стали жесткими и не побудили к более критическому подходу к задачам обработки и к условиям применимости метода.

Исследуем краткое описание метода наименьших квадратов в двух аспектах его применения в задачах обработки траекторных измерений: 1) одномерное сглаживание измерений только одной измеряемой величины; 2) векторное сглаживание разнородных избыточных траекторных измерений.

Рассмотрим сначала одномерное сглаживание. Пусть в дискретные моменты времени

$$t_1, t_2, \dots, t_n \quad (7.145)$$

из некоторого интервала $[a, b]$ производятся измерения какой либо измеряемой траекторной величины $u(t)$ и пусть результаты измерений имеют вид

$$U_i = u(t_i) + \xi_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (7.146)$$

где $\xi_1, \dots, \xi_n$ — нормально распределенные независимые друг от друга случайные величины, каждое с нулевым математическим ожиданием и известной дисперсией: $M\xi_i = 0, M\xi_i^2 = \sigma_i^2, i = 1, 2, \dots, n$.

Пусть далее неизвестная измеряемая функция $u(t)$ аппроксимируется функциями вида

$$m$$

$$k=0$$

где $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m$ — неизвестные параметры, подлежащие оцениванию по измерениям; $\varphi_0(t), \varphi_1(t), \dots, \varphi_m(t)$ — известные функции (полиномы, сплайны или какие-либо другие), образующие линейно независимую систему на множестве точек ($m < n$).

В соответствии с методом наименьших квадратов для наилучшие оценки параметров $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m$ принимают такие значения $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m$, которые удовлетворяют условию

$$\Phi(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m) = \min \Phi(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m),$$

$$u(t) \approx \sum a_k \varphi_k(t), \quad (7.147)$$

где

$$\Phi(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m) = \sum_{i=1}^n p_i^2 \left[U_i - \sum_{k=0}^m \alpha_k \varphi_k(t_i) \right]^2; \quad (7.148)$$

p_i^2 – веса измерений (обычно полагают $p_i^2 = 1 / \sigma_i^2$).

Требуемые оценки находят как решение системы нормальных уравнений. В матричной форме она имеет вид

$$\mathbf{A} \alpha = b, \quad (7.149)$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} (\varphi_0, \varphi_0) & (\varphi_0, \varphi_1) & \dots & (\varphi_0, \varphi_m) \\ (\varphi_1, \varphi_0) & (\varphi_1, \varphi_1) & \dots & (\varphi_1, \varphi_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\varphi_m, \varphi_0) & (\varphi_m, \varphi_1) & \dots & (\varphi_m, \varphi_m) \end{bmatrix}; \quad \alpha = \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} (U, \varphi_0) \\ (U, \varphi_1) \\ \vdots \\ (U, \varphi_m) \end{bmatrix};$$

$$(\varphi_k, \varphi_j) = \sum_{i=1}^n p_i^2 \varphi_k(t_i) \varphi_j(t_i); \quad (U, \varphi_j) = \sum_{i=1}^n p_i^2 U_i \varphi_j(t_i).$$

Поскольку система функций $\varphi_0(t), \varphi_1(t), \dots, \varphi_m(t)$ выбрана линейно независимой на множестве точек, можно показать, что матрица $\mathbf{A}$ этой системы функций будет невырожденной. Следовательно, система будет иметь единственное решение

$$\hat{\alpha} = \mathbf{A}^{-1} b,$$

где $\mathbf{A}^{-1}$ – матрица, обратная $\mathbf{A}$.

Оценки $\hat{\alpha}_0, \hat{\alpha}_1, \dots, \hat{\alpha}_m$, будучи функциями от измерений, являются случайными величинами, математические ожидания которых совпадают с истинными значениями параметров $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m$ (т.е. оценки являются несмещенными), а корреляционной матрицей этих оценок есть матрица $\sigma_0^2 \mathbf{A}^{-1}$, где

$$\sigma_0^2 = \frac{\Phi(\hat{\alpha}_0, \hat{\alpha}_1, \dots, \hat{\alpha}_m)}{n - (m + 1)}.$$

Если выполнены предположения относительно случайных погрешностей измерений $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$, то дисперсии найденных оценок будут минимальными по сравнению с дисперсиями любых других линейных оценок параметров $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m$.

В рассмотренном варианте применение метода наименьших квадратов в качестве класса $F[a, b]$ аппроксимирующих функций взято $(m + 1)$ -мерное линейное

многообразие всех функций, порожденное заданными линейно независимыми функциями $\varphi_0(t), \varphi_1(t), \dots, \varphi_m(t)$. В рассматриваемом варианте метода наименьших квадратов расстояние $\rho(g/h)$ между произвольными функциями $g(t)$ и $h(t)$ задается соотношением

$$\rho(g, h) = \sum_{i=1}^n p_i^2 [g(t_i) - h(t_i)]^2$$

и является естественным следствием самого метода.

Как уже отмечалось, в практике обработки траекторных измерений в качестве аппроксимирующих функций чаще всего используются степенные полиномы. Тогда

$$\varphi_k(t) = (t - t_0)^k, \quad k = 0, 1, \dots, m,$$

а $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m$ — коэффициенты этих полиномов.

Если в таком случае скалярное произведение двух произвольных функций $g(t)$ и $h(t)$ определить равенством

$$(g/h) = \sum_{i=1}^n p_i^2 g(t_i) h(t_i)$$

и по схеме полиномиальной аппроксимации построить систему ортогональных полиномов $\varphi_0(t), \varphi_1(t), \dots, \varphi_m(t)$ и использовать их в выражении (7.147) и далее, то матрица A системы (7.149) превратится в диагональную матрицу с элементами $\|\varphi_0\|^2, \|\varphi_1\|^2, \dots, \|\varphi_m\|^2$ на главной диагонали. Тогда легко находим, что

$$\hat{\alpha}_k = \frac{(U, \varphi_k)}{\|\varphi_k\|^2}, \quad k = 0, 1, \dots, m, \quad (7.150)$$

и наилучшей (в смысле метода наименьших квадратов) аппроксимацией неизвестной измеряемой величины $u(t)$ будет функция

$$\hat{U}(t) = \sum_{k=0}^m \frac{(U, \varphi_k)}{\|\varphi_k\|^2} \varphi_k(t). \quad (7.151)$$

Выше отмечалось, что ортогональные полиномы очень удобны при изменении степени аппроксимирующих функций. В самом деле, если возникает необходимость в выражение для $\hat{U}(t)$ добавить еще одно слагаемое $\alpha_{m+1}\varphi_{m+1}(t)$, то достаточно вычислить

$$\hat{\alpha}_{m+1} = \frac{(U, \varphi_{m+1})}{\|\varphi_{m+1}\|^2}.$$

Тогда

$$u(t) = \sum_{k=0}^{m+1} \frac{(U, \varphi_k)}{\|\varphi_k\|^2} \varphi_k(t),$$

т.е. при этом остальные коэффициенты $\hat{\alpha}_0, \hat{\alpha}_1, \dots, \hat{\alpha}_m$ остаются неизменными, как они определены в (7.150). Если бы такое увеличение степени совершалось в случае использования обычных степенных полиномов, то коэффициенты $\hat{\alpha}_0, \hat{\alpha}_1, \dots, \hat{\alpha}_m$ пришлось бы определять заново вместе с $\hat{\alpha}_{m+1}$.

Перейдем к решению задачи векторного сглаживания разнородных структурно избыточных измерений, причем необязательно синхронных. Сглаживание в этом случае названо векторным потому, что теперь одновременно находят все три координаты ЛА – $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$.

Пусть в течение некоторого интервала времени $[a, b]$ наблюдается движение ЛА и производится измерение траекторных величин $(D(t), K_x(t), K_y(t), \beta(t), \varepsilon(t), \alpha(t), \delta(t))$ различными территориально разнесенными измерительными средствами. Для удобства дальнейшего изложения предположим, что все измеряемые величины каким-нибудь образом пронумерованы и переобозначены в виде $u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)$. В самом общем виде будем предполагать, что измерения не синхронны, т.е. каждая из величин $u_j(t)$ измеряется в свои моменты времени

$$t_{j1}, t_{j2}, \dots, t_{jni}$$

из интервала $[a, b]$. Будем предполагать также, что результатами измерений являются случайные величины U_{ji} , представимые в виде

$$U_{ji} = U_j(t_{ji}) + \xi_{ji}, \quad i = 1, 2, \dots, n_j; j = 1, 2, \dots, M, \quad (7.152)$$

где ξ_{ji} – независимые (как по i , так и по j) нормально распределенные случайные величины, каждое с нулевым математическим ожиданием и известной дисперсией:

$$M\xi_{ji} = 0, \quad M\xi_{ji}^2 = \sigma_{ji}^2.$$

Пусть, далее, неизвестные координаты ЛА $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ аппроксимируются выражениями вида

$$x(t) = \sum_{k=0}^m a_{1k} \varphi_k(t); \quad (7.153)$$

$$y(t) = \sum_{k=0}^m a_{2k} \varphi_k(t); \quad (7.154)$$

$$z(t) = \sum_{k=0}^m a_{3k} \varphi_k(t), \quad (7.155)$$

где $a_{10}, a_{11}, \dots, a_{1m}$; $a_{20}, a_{21}, \dots, a_{2m}$; $a_{30}, a_{31}, \dots, a_{3m}$ – неизвестные коэффициенты, подлежащие оцениванию по совокупности всех измерений, а $\varphi_0(t), \varphi_1(t), \dots, \varphi_m(t)$

являются, как и прежде, известными линейно независимыми функциями на интервале $[a, b]$ (полиномами или сплайнами). Для удобства изложения в выражениях для аппроксимации каждой из координат $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ взяты одни те же функции $\varphi_0(t), \varphi_1(t), \dots, \varphi_m(t)$. В практических задачах обработки траекторных измерений так обычно и поступают. Конечно, для большой общности рассуждений можно было бы взять три разные системы функций и каждую из координат аппроксимировать разным числом слагаемых из таких функций. Однако такая общность принципиально нового не дает, зато она заметно усложнило бы изложение.

Нетрудно видеть, что каждая из измерительных функций $u_j(t)$ связана с функциями $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ (изменяющимися во времени прямоугольными координатами ЛА) вполне определенной зависимостью

$$u_j = f_j(x, y, z), \quad j = 1, 2, \dots, M, \quad (7.156)$$

задающей преобразование координат x, y, z в систему, где одной из координат является величина $u_j(t)$. Функция $f_j(x, y, z)$ считается известной для каждого $j = 1, 2, \dots, M$. Функция $u_j(t)$ является нелинейной функцией, т.е.

$$u_j(t) = u_j(t; \alpha), \quad (7.157)$$

где α – вектор-столбец параметров.

В соответствии с методом наименьших квадратов за наилучшую оценку вектора неизвестных параметров α принимают такое его значение $\hat{\alpha}$, которое удовлетворяет условию

$$\Phi(\hat{\alpha}) = \min \Phi(\alpha),$$

где

$$\Phi(\alpha) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{n_j} p_{ji}^2 [U_{ji} - u_j(t_i; \alpha)]^2; \quad (7.158)$$

p_{ji}^2 – веса измерений (обычно полагают $p_{ji}^2 = 1 / \sigma_{ji}^2$).

Поскольку на практике функции обычно непрерывно дифференцируемы по компонентам вектора α , то для минимизации функционала $\Phi(\alpha)$ вида (7.158) чаще всего применяют методы, использующие необходимое условие экстремума, т.е. решают систему нормальных уравнений

$$\frac{d\Phi}{d\alpha_{pq}} = 0, \quad p = 1, 2, 3; \quad q = 0, 1, \dots, m$$

или

$$\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{n_j} p_{ji}^2 [U_{ji} - u_j(t_i; \alpha)] \frac{du_j(t_i; \alpha)}{d\alpha_{pq}} = 0, \quad p = 1, 2, 3; \quad q = 0, 1, \dots, m. \quad (7.159)$$

Однако теперь эта система нелинейна относительно компонент вектора α и для ее решения необходимо привлекать соответствующие приближенные методы. Один из наиболее простых методов состоит в следующем. Задавшись некоторым начальным приближением α^0 к искомому вектору α , каждую из функций $u_j(t_i; a)$ линеаризуют в окрестности точки α^0 :

$$u_j(t_i; a) \approx u_j(t_i; a^0) + \sum_{p=1}^3 \sum_{q=0}^m \frac{du_j(t_i; a^0)}{d\alpha_{pq}} (\alpha_{pq} - \alpha_{pq}^0),$$

а затем используют эту линеаризованную функцию в функционале вместо исходной функции $u_j(t_i; a)$. В этом случае система оказывается линейной относительно α .

Решив эту систему, найдем следующие приближения α^1 к вектору α , после чего процесс снова повторим, в результате чего найдем α^2 , и т.д. такой итерационный процесс повторяют до выполнения некоторых критериев остановки.

Особенностью описанного приближенного метода минимизации является то, что в нем помимо значений функций $u_j(t_i; a)$ используются еще и их первые производные по компонентам вектора α .

Более сложными являются методы, в которых система решается без предварительной линеаризации функций $u_j(t_i; a)$. В этих методах используются производные от функций $u_j(t_i; a)$ по компонентам вектора α второго и даже третьего порядков.

Задача минимизации функционала обладает рядом существенных отличий по сравнению с задачей минимизации функционала.

Функционал унимодален и его система нормальных уравнений линейна. Трудности при минимизации функционала если и возникают, обычно связаны только с плохой обусловленностью матрицы A системы. Функционал же значительно более сложен. В общем случае он уже не является унимодальным, отсюда проблема поиска его глобального минимума. Система нормальных уравнений у этого функционала нелинейна. Следовательно, для минимизации в данном случае необходимо применять иные итерационные методы, отсюда – проблема сходимости итерационных процессов. Эти проблемы весьма сложны и их исчерпывающего решения для задач обработки траекторных измерений еще нет.

Компоненты $\hat{\alpha}_{pq}$ вектора $\hat{\alpha}$, найденные в результате минимизации функционала (7.158), являются функциями от измерений (7.152) и потому представляют собой случайные величины. Однако в отличие от предыдущего варианта метода наименьших квадратов, где оценки зависят от измерений линейно, теперь $\hat{\alpha}_{pq}$ зависят от измерений нелинейно. Следовательно, теперь уже нельзя столь же просто судить о математическом ожидании этих оценок и их корреляционной матрицы. Из-за сложности этого вопроса он здесь не рассматривается.

В последнее время из-за значительного увеличения прикладных задач, связанных со статистической оценкой вектора состояния по результатам измерений, из-за возрастания требований к качеству такого оценивания, резко возрос интерес к анализу фундаментальных предложений, лежащих в основе статической обработки измерений, в том числе и траекторных. Выяснилось, что на практике редко выполняются условия применимости оптимальных статистических методов, в частности, что случайные погрешности траекторных измерений распределены по законам, близким к нормальному, но не совпадающим с ним, а также – и это особенно важно, – что так называемые параметрические методы статистики, к которым относится и метод наименьших квадратов, очень чувствительны даже к малым нарушениям условий их применения. Например, метод наименьших квадратов оказался очень чувствительным к нарушению нормальности распределения случайных погрешностей обрабатываемых траекторных измерений, и учитывать их стало особенно важно в свете сильно возросших требований к качеству оценок траекторных параметров.

7.6.2. Метод максимума правдоподобия

Прежде чем перейти к рассмотрению существа метода, сделаем необходимые определения. Будем считать, что измерения параметров траектории производятся не непрерывно, а лишь в дискретные моменты времени $t_1, t_2, t_3, \dots, t_i, \dots, t_N$ (N – число измерений). Измерения состоят из полезного сигнала и помехи (шума). Для наглядности понимания решаемых задач введем геометрические понятия: пространство шума, пространство параметров полезного сигнала и пространство измерений.

Нас будут интересовать значения шума

$$\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_i, \dots, \Delta_N \quad (7.160)$$

лишь в указанные выше моменты времени.

Если $N = 2$, то имеет место система из двух переменных, которая геометрически изображается точкой на плоскости Δ_1 и Δ_2 . Если $N = 3$, то это уже система трех переменных, геометрически представляемая точкой в пространстве с декартовыми координатами $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$, или, иначе, – это радиус-вектор с тремя декартовыми координатами $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$.

По аналогии введем вектор шума Δ с декартовыми координатами $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N$:

$$\Delta = (\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N). \quad (7.161)$$

Пространство, в котором определен вектор Δ (7.160), называется пространством шума. По аналогии с трехмерным – это N -мерное пространство.

Часто N -мерный вектор представляется тождественно как матрица-столбец

$$\Delta = \begin{pmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \\ \vdots \\ \Delta_N \end{pmatrix} \quad (7.162)$$

или как матрица-строка

$$\Delta = \|\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N\|. \quad (7.163)$$

Так как значения шума случайны, то исчерпывающей вероятностной характеристикой является *плотность вероятности вектора* Δ , т.е. совместная плотность вероятности:

$$\varphi(\Delta) = \varphi(\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N). \quad (7.164)$$

Пространство параметров полезного сигнала связано с вектором параметров α так же, как пространство шума связано с вектором Δ . Оно представляет собой r -мерное пространство с декартовыми координатами $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r, \dots, \alpha_n)$.

Вектор α может быть представлен либо как матрица-столбец

$$\alpha^1 = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{pmatrix}, \quad (7.165)$$

либо как матрица-строка

$$\alpha^1 = \|\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n\|. \quad (7.166)$$

Если значения параметров сигнала случайны, то их исчерпывающей характеристикой является плотность вероятности вектора α :

$$\varphi(\alpha) = \varphi(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_N). \quad (7.167)$$

Введем пространство измерений или иначе пространство наблюдений. Рассмотрим дискретные значения измерений $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_N$

$$\mathbf{x} = \|x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\|, \quad (7.168)$$

N -мерное пространство этого вектора и есть пространство наблюдений.

Исчерпывающей вероятностной характеристикой вектора $\mathbf{x}$ является плотность вероятности:

$$\varphi(\mathbf{x}) = \varphi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N). \quad (7.169)$$

Следует еще раз подчеркнуть, что по зарегистрированным значениям вектора $\mathbf{x}$ нельзя точно узнать значения α , так как в процессе наблюдения измерительная станция регистрирует значение α с неотделимым от него случайным шумом n .

Если мы определим модель движения тела, то тем самым зафиксируем размерность и форму вектора α . В этом случае можно записать плотность вероятности:

$$\varphi(\mathbf{x} / \alpha) = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_N / \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r), \quad (7.170)$$

которая представляет собой плотность вероятности для вектора $\mathbf{x}$ при условии, что вектор параметров α задан, фиксирован.

Таким образом, если в нашем распоряжении имеются измерения $\mathbf{x}$, то функция (7.170) зависит лишь от $\mathbf{a}$. Введем обозначение

$$\varphi(\mathbf{x} / \mathbf{a}) = L(\mathbf{a}). \quad (7.171)$$

С функцией правдоподобия связан наиболее простой из методов оценки значений вектора $\mathbf{a}$, называемый *методом максимума правдоподобия*. Сформулируем его в виде следующего правила: *наиболее правдоподобно то значение параметра $\mathbf{a}$, для которого функция правдоподобия $L(\mathbf{a})$ максимальна*.

Это утверждение проистекает исключительно из соображений здравого смысла. Приведем пример, подтверждающий ценность этого правила.

Курсант, сдавая зачет, может получить либо хорошую оценку (зачет), либо плохую оценку (незачет). Оценка в основном зависит от его знания. Однако другие обстоятельства, например состояние здоровья или волнение отвечающего, случайная удача или неудача при выборе билета, также могут повлиять в ту или иную сторону на его ответ, и следовательно на оценку. Будем считать для простоты, что знание $\mathbf{a}$ курсанта имеют лишь две градации. Они либо хорошие ($\alpha_1 = 1$), либо плохие ($\alpha_2 = 0$). Допустим также, что ответ (измерения) курсанта может быть либо хорошим ($x_1 = 1$), либо плохим ($x_2 = 0$). На основании опыта приема экзаменов преподаватель может составить таблицу вероятностей $p(\mathbf{x} / \mathbf{a})$. В ней будут четыре числа: вероятность $p(1/1)$ хорошего ответа при хороших знаниях; вероятность $p(0/1)$ плохого ответа при хороших знаниях; вероятность $p(1/0)$ хорошего ответа при плохих знаниях и, наконец, вероятность $p(0/0)$ плохого ответа при плохих знаниях. Естественно, что

$$p(1/1) > p(1/0) \text{ и } p(0/0) > p(0/1).$$

Допустим теперь, что экзаменатор принял сигнал, поступивший в виде ответа от курсанта. Оказалось, что $\mathbf{x} = 0$, т.е. ответ плохой. Какое решение о знаниях слушателя должен вынести преподаватель? Очевидно, он должен основываться на вероятностях $p(0/0)$ и $p(0/1)$ плохого ответа при наличии плохих и хороших знаний. Разумное рассуждение состоит в следующем: преподаватель считает, что при данном значении $\mathbf{x} = 0$ правдоподобнее то значение $\mathbf{a}$, для которого вероятность

$$p(\mathbf{x} = 0 / \mathbf{a}) = p(0 / \mathbf{x})$$

(а это и есть функция правдоподобия) больше. Так как $p(0/0) = p(x=0 / \alpha=0) > p(x=0 / \alpha=1) = p(0/1)$, то экзаменатор должен дать знаниям курсанта плохую оценку ($\mathbf{a} = 0$).

В повседневной практике каждому из нас часто приходится по интуиции пользоваться оценками типа максимума правдоподобия. Мы считаем более правдоподобной такую причину $\mathbf{a}$, при которой наблюдавшееся в действительности следствие $\mathbf{x}$ более вероятно.

Оценка значения параметра α по методу максимума правдоподобия производится так:

пусть в результате наблюдения принят сигнал – вектор $\mathbf{x}$. При дискретном распределении α записываем все возможные значения правдоподобия:

$$L(\alpha_1), L(\alpha_2), \dots, L(\alpha_v). \quad (7.172)$$

Сравнивая эти значения, выбираем такое α_j , для которого значение функции правдоподобия больше (или меньше) остальных значений функции:

$$L(\alpha_v) \geq L(\alpha_k) \quad (v = 1, 2, \dots, r). \quad (7.173)$$

Избранное таким методом значение параметра α_v называется наиболее правдоподобным. Этот метод естественным образом распространяется на задачи с непрерывным распределением α . Выбирается такое значение α , для которого значение $\varphi(\mathbf{x} / \alpha) = L(\alpha)$ максимально. Конкретные алгоритмы оценки α отличаются друг от друга за счет разных законов $\varphi(\mathbf{x} / \alpha)$ и видов зависимостей $A(t)$.

Алгоритм метода максимума правдоподобия. Построим в соответствии с изложенным выше принципом алгоритм оценки параметров траектории методом максимального правдоподобия по результатам внешнетраекторных измерений. Полагаем, что один из параметров траектории полета ракеты может быть представлен полиномом

$$g(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \dots + \alpha_v t^2 = \sum_{v=0}^r \alpha_v t^v. \quad (7.174)$$

При дискретном измерении

$$g(t_i) = \sum_{v=0}^r \alpha_v t_i^v, \quad (7.175)$$

где $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_r$ – компоненты вектора α .

Измерения в таком случае являются многомерной случайной величиной с математическим ожиданием (7.175).

В практике внешнетраекторных измерений в качестве закона, характеризующего ошибки измерений, принимается нормальное распределение. Это положение основывается на большом числе факторов, участвующих в формировании погрешности измерений. Прежде чем записать выражение для многомерного нормального закона распределения, введем необходимые исходные данные.

Компонентами вектора измерений являются N измерения, произведенные в дискретные моменты времени:

$$X_1, X_2, \dots, X_N. \quad (7.176)$$

Для обозначения текущих номеров измерений введем индексы i и j , корреляционная связь между значениями измерений которых полностью определена корреляционной матрицей

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1N} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{N1} & k_{N2} & \dots & k_{NN} \end{bmatrix}, \quad (7.177)$$

где k_{ij} – элементы матрицы, определяющие корреляционную связь между i - и j -м значениями вектора измерений.

Используя введенные исходные данные, запишем формулу плотности вероятности многомерного нормального закона распределения вектора измерений $\mathbf{x}$ при условии, что математическое ожидание траектории имеет вид выражения:

$$\varphi(\mathbf{x} / \mathbf{a}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N |\mathbf{K}|}} e^{-\frac{1}{2|\mathbf{K}|} \sum_{i,j=1}^N K_{ij} \xi_i \xi_j}, \quad (7.178)$$

где $|\mathbf{K}|$ – определитель корреляционной матрицы, т.е. вычисленное по определенному правилу число; K_{ij} – алгебраическое дополнение элемента k_{ij} матрицы, которое образуется как произведение минора этого элемента на $(-1)^{i+j}$.

Символы ξ_i и ξ_j , введенные для сокращения записи, означают следующее:

$$\begin{aligned} \xi_i &= x_i - \sum_{v=0}^{\tau} a_v t_i^v; \\ \xi_j &= x_j - \sum_{v=0}^{\tau} a_v t_j^v. \end{aligned} \quad (7.179)$$

Выражение (7.178) получают непосредственным обобщением известной формулы одномерного нормального распределения.

В соответствии с правилом, сформулированным в предыдущем параграфе, найдем такую оценку $\mathbf{a}$, которая давала бы максимальное значение условной вероятности, т.е. функции правдоподобия.

В дальнейшем для упрощения записи оценку вектора $\mathbf{a}$ также будем обозначать через $\mathbf{a}$. Там же, где речь пойдет одновременно о векторе $\mathbf{a}$ и его оценке, будем вводить специальные обозначения. Однако использовать показательную функцию для нахождения оценки $\mathbf{a}$ неудобно, вследствие возникающих при этом аналитических трудностей. Поэтому используют натуральный логарифм выражения для плотности вероятности (7.178). учитывается и то, что функция и ее натуральный логарифм имеют максимум в одной точке. Найдем

$$\ln \varphi(\mathbf{x} / \mathbf{a}) := \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N |\mathbf{K}|}} - \frac{1}{2|\mathbf{K}|} \sum_{i,j=1}^N K_{ij} \xi_i \xi_j. \quad (7.180)$$

Чтобы определить значения соответствующих компонент $a_0, a_1, \dots, a_\tau$ вектора $\mathbf{a}$ при которых выражение (7.180) максимально, воспользуемся правилом отыскания экс-

третью сложную функцию. В соответствии с этим правилом найдем частные производные выражения (7.180) последовательно по $a_0, a_1, \dots, a_\tau$, и приравняем их к нулю. В общем виде будем искать производные по a_s , где s пробегает значения $0, 1, 2, \dots, \tau$.

Дифференцируя выражения (7.180) по a_s как сложную функцию, получаем

$$\frac{d \ln \varphi(\mathbf{x} / \mathbf{a}_s)}{d \mathbf{a}} - \sum_{i,j=1}^N \frac{d \ln \varphi d \xi_i}{d \xi_j d a_s} = -\frac{1}{2|K|} \sum_{i,j=1}^N K_{ij} \xi_j t_i^s, \quad (7.181)$$

где $s = 0, 1, 2, \dots, \tau$.

Приравнявая выражения (7.181) к нулю, получаем систему из $\tau + 1$ уравнений для определения всех составляющих вектора $\mathbf{a}$. Запишем ее в виде

$$\sum_{i,j=1}^N \frac{K_{ij}}{|K|} \xi_j t_i^s = 0, \quad s = 0, 1, 2, \dots, \tau. \quad (7.182)$$

Используя (7.179), окончательно находим

$$\sum_{i,j=1}^N \frac{K_{ij}}{|K|} \left(x_j - \sum_{v=0}^{\tau} a_v t_i^v \right) t_i^{s1} = d', \quad s = 0, 1, 2, \dots, \tau. \quad (7.183)$$

Таким образом, найдена система уравнений метода максимального правдоподобия для определения неизвестных коэффициентов полинома (7.182), представляющего параметр траектории движения объекта.

Оценки искомых параметров, полученные на основании решения уравнений максимального правдоподобия, обладают рядом свойств. Приведем основные из них.

1. Оценка максимального правдоподобия оказывается всегда состоятельной. Это означает, что при $N \rightarrow \infty$ с вероятностью, равной единице, уравнение правдоподобия имеет решение α , причем $P\{|\mathbf{a} - \mathbf{a}_0| > \varepsilon\} \rightarrow 0$ при $N \rightarrow \infty$ заданном $\varepsilon > 0$, где $\mathbf{a}_0$ – истинное значение оцениваемой величины.

2. Решение $\mathbf{a}$ уравнения правдоподобия асимптотически (при $N \rightarrow \infty$) распределено по нормальному закону с математическим ожиданием, равным $\mathbf{a}_0$, и минимальной дисперсией $\delta_{\min}^2$.

3. Оценка $\mathbf{a}$ является асимптотически эффективной, т.е. не существует другой асимптотически нормальной оценки, имеющей меньшую дисперсию. Реализовать алгоритм обработки данных траекторных измерений, основанный на применении метода максимального правдоподобия, весьма сложно даже при использовании современных ЭВМ. Это объясняется тем, что для получения значений коэффициентов K_{ij} уравнений правдоподобия необходимо многократно вычислять определители, порядок которых равен числу измерений или на единицу ниже. Кроме того, как правило, возникают большие затруднения при определении элементов корреляционной матрицы. Поэтому на практике находят более простые схемы расчета, связанные с упрощением матрицы.

Получена система линейных уравнений для оценки составляющих вектора $\mathbf{a}'$. Число уравнений соответствует $(\tau+1)$ -му неизвестных компонент a_v ($v = 0, 1, 2, \dots, \tau$).

В практике использования метода систему часто представляют в матричной форме. С этой целью обозначим $\varphi_{iv+1} = \tau_i^v$ $\tau+1 = n$ и введем

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \dots & \varphi_{1n} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \dots & \varphi_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_{N1} & \varphi_{N2} & \dots & \varphi_{Nn} \end{bmatrix}; \Phi^T = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \dots & \varphi_{N1} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \dots & \varphi_{N2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_{1N} & \varphi_{2N} & \dots & \varphi_{NN} \end{bmatrix},$$

где «Т» означает операцию транспонирования. Кроме того, напомним, что $\mathbf{a}'$ – матрица-столбец, обозначим ее буквой $\mathbf{A}$, $\mathbf{x}'$ – матрица-столбец, обозначим ее – $\mathbf{X}$.

Существует еще диагональная матрица весов

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1 & 00 & \dots & 0 \\ 0 & p_2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 00 & \dots & p_N \end{bmatrix}.$$

На основании правила перемножения матриц система может быть записана в виде

$$CA = \Phi^T p x,$$

где $C = \Phi^T p \Phi$.

Можно показать, что замещенные оценки вектора $\mathbf{a}$ представляют собой случайный нормальный распределенный вектор с корреляционной матрицей

$$B_a = \sigma^2 C^{-1}.$$

Отсюда σ^2 можно рассматривать как дисперсию ошибки оценки параметра траектории движения ракеты $q(t)$ по результатам внешнетраекторных измерений.

Равноточные измерения. Погрешность в измерениях некоррелирована, и дисперсия в ходе измерения постоянна, т.е.

$$k_{ij} = \text{при } i \neq j;$$

$$k_{ij} = \sigma^2 = D \text{ при } i = j; \quad (7.190)$$

$$p_1 = p_2 = p_N \text{ при } i = j.$$

Этот случай находит широкое распространение в практике обработки траекторных измерений. Заметим, что если интервал дискретности выбран достаточно большим, то помеха будет некоррелирована. Если сглаживанию подлежат параметры, непосредственно измеряемые измерительным средством, то предположение

о постоянстве дисперсии погрешности измерений тоже вполне правомочно в достаточно широких пределах изменения параметров.

Система упрощается за счет условия, так как она сокращается на p_i . В результате находим систему уравнений для определения вектора $\mathbf{a}$:

$$\sum_{i=1}^N \left(x_i - \sum_{v=0}^{\tau} a_v t_i^v \right) t_i^s = 0, \quad (7.191)$$

где $s = 0, 1, \dots, \tau$ или

$$\begin{aligned} a_0 N + a_1 \sum t_i + \dots + a_{\tau} \sum t_i^{\tau} &= \sum x_i; \\ a_0 \sum t_i + a_1 \sum t_i^2 + \dots + a_{\tau} \sum t_i^{\tau+1} &= \sum x_i t_i; \\ &\dots\dots\dots \\ a_0 \sum t_i^{\tau} + a_1 \sum t_i^{\tau+1} + \dots + a_{\tau} \sum t_i^{2\tau} &= \sum x_i t_i^{\tau}. \end{aligned} \quad (7.192)$$

В матричной форме

$$\Phi^T \Phi \mathbf{A} = \Phi^T \mathbf{X}. \quad (7.193)$$

Система уравнений для оценки неизвестных a_v может быть получена иным путем. Пусть, как и выше, $x_1, x_2, \dots, x_N$ – значения измерений траектории, истинными значениями которой являются

$$q(t_0), q(t_1), \dots, q(t_N);$$

$$q(t_i) = \sum_{v=0}^{\tau} a_v t_i^v.$$

Какие значения параметров $q(t_i)$ лучше всего согласуются с наблюдаемыми значениями $x_1, x_2, \dots, x_N$? Сформулируем следующий критерий наилучшего согласования или критерий оптимальности.

Будем считать согласование наилучшим в том случае, когда сумма квадратов ошибки

$$F = [x_0 - q(t_0)]^2 + \dots + [x_N - q(t_N)]^2$$

минимальна. Или, иначе, необходимо найти такие a_v , чтобы сумма квадратов

$$F = \sum_{i=1}^N \left(x_i - \sum_{v=0}^{\tau} a_v t_i^v \right)^2 \quad (7.194)$$

была минимальна.

Для отыскания a_v , при которых достигается минимум выражения, необходимо продифференцировать (7.194) последовательно по всем a_v , а производные приравнять нулю. Произведем указанные операции и получим систему

$$\sum_{i=1}^N \left[x_i - \sum_{v=0}^{\tau} a_v t_i^v \right] t_i = 0, \quad (7.195)$$

где $s = 0, 1, 2, \dots, \tau$, которая получена из вероятностного рассмотрения вопроса.

Критерий оптимальности системы обработки в виде требования минимума суммы квадратов ошибок определил название метода оптимальной обработки, который именуется методом наименьших квадратов.

Остановимся на основных способах решения систем линейных уравнений (7.188) или (7.189).

7.6.3. Методы решения систем линейных уравнений

Вначале рассмотрим наиболее простой способ последовательного исключения неизвестных, который называют методом Гаусса.

Метод Гаусса. Сущность метода рассмотрим на примере решения системы линейных уравнений 4-го порядка:

$$\begin{aligned} m_{11} \alpha_1 + m_{12} \alpha_2 + m_{13} \alpha_3 + m_{14} \alpha_4 &= m_{15} ; \\ m_{21} \alpha_1 + m_{22} \alpha_2 + m_{23} \alpha_3 + m_{24} \alpha_4 &= m_{25} ; \\ m_{31} \alpha_1 + m_{32} \alpha_2 + m_{33} \alpha_3 + m_{34} \alpha_4 &= m_{35} ; \\ m_{41} \alpha_1 + m_{42} \alpha_2 + m_{43} \alpha_3 + m_{44} \alpha_4 &= m_{45} . \end{aligned} \quad (7.196)$$

Пусть $m_{11} \neq 0$. Этот элемент называют ведущим. Исключим на первом этапе неизвестное α_1 . Для этого разделим коэффициенты первого уравнения системы (7.196) на m_{11} и получим

$$\alpha_1 + l_{12} \alpha_2 + l_{13} \alpha_3 + l_{14} \alpha_4 = l_{15} , \quad (7.197)$$

где $l_{ij} = \frac{m_{ij}}{m_{11}} (j > 1)$.

Из второго уравнения системы (7.196) вычтем уравнение (7.197), умноженное на m_{21} , из третьего – (7.197), умноженное на m_{31} , и т.д. В результате получим систему из трех уравнений:

$$\begin{aligned} m_{22}^{(1)} \alpha_2 + m_{23}^{(1)} \alpha_3 + m_{24}^{(1)} \alpha_4 &= m_{25}^{(1)} ; \\ m_{32}^{(1)} \alpha_2 + m_{33}^{(1)} \alpha_3 + m_{34}^{(1)} \alpha_4 &= m_{35}^{(1)} ; \\ m_{42}^{(1)} \alpha_2 + m_{43}^{(1)} \alpha_3 + m_{44}^{(1)} \alpha_4 &= m_{45}^{(1)} , \end{aligned} \quad (7.198)$$

где коэффициенты $m_{ij}^{(1)}$ ($ij \geq 2$) вычисляются по формуле

$$m_{ij}^{(1)} = m_{ij} - m_{ij} l_{ij} \quad (i, j \geq 2). \quad (7.199)$$

Разделив далее коэффициенты первого уравнения системы (7.198) на ведущий элемент $m_{22}^{(1)}$, получим

$$\alpha_2 + l_{23}^{(1)} \alpha_3 + l_{24}^{(1)} \alpha_4 = l_{25}^{(1)}; \quad (7.200)$$

$$l_{2j} = \frac{m_{2j}}{m_{22}^{(1)}} \quad (j > 2). \quad (7.201)$$

Исключая теперь α_2 таким же образом, как исключали α_1 , имеем

$$\begin{aligned} m_{33}^{(2)} \alpha_3 + m_{34}^{(2)} \alpha_4 &= m_{35}^{(2)} \\ m_{43}^{(2)} \alpha_3 + m_{44}^{(2)} \alpha_4 &= m_{45}^{(2)}, \end{aligned} \quad (7.202)$$

где

$$m_{ij}^{(2)} = m_{ij}^{(1)} - m_{i2}^{(1)} l_{2j} \quad (i, j \geq 3); \quad m_{i2}^{(1)} = m_{ij}^{(1)} - m_{i2}^{(1)} l_{2j} \quad (i, j \geq 3). \quad (7.203)$$

Разделив коэффициенты первого уравнения системы на ведущий элемент $m_{33}^{(2)}$, получим

$$\alpha_3 + l_{34}^{(2)} \alpha_4 = l_{35}^{(2)}, \quad (7.204)$$

где

$$l_{3j}^{(2)} = \left(\frac{m_{3j}^{(2)}}{m_{33}^{(2)}} \right) \quad (j > 3). \quad (7.205)$$

Проведем операцию исключения α_3 , тогда

$$m_{44}^{(3)} \alpha_4 = m_{45}^{(3)}, \quad (7.206)$$

где

$$m_{ij}^{(3)} = m_{ij}^{(2)} - m_{i3}^{(2)} l_{3j}^{(2)}, \quad (i, j \geq 4). \quad (7.207)$$

Из уравнения (7.191) уже можно написать выражения для определения неизвестного

$$\alpha_4 = \frac{m_{45}^{(3)}}{m_{44}^{(3)}}. \quad (7.208)$$

Остальные неизвестные последовательно определяются из уравнений (7.184), (7.200), (7.197):

$$\begin{aligned} \alpha_3 &= l_{35}^{(2)} - l_{34}^{(2)} \alpha_4; \\ \alpha_2 &= l_{25}^{(1)} - l_{23}^{(1)} \alpha_3 - l_{24}^{(1)} \alpha_4; \\ \alpha_1 &= l_{15} - l_{12} \alpha_2 - l_{13} \alpha_3 - l_{14} \alpha_4. \end{aligned} \quad (7.209)$$

Необходимым и достаточным условием реализации метода является неравенство нулю всех «ведущих» элементов. Процесс нахождения коэффициентов l_{ij} называется *прямым ходом*, процесс получения значений неизвестных – *обратным ходом*. Часто используют иной метод точного решения – метод обратной матрицы или метод Крамера.

Метод Крамера. В соответствии с этим методом коэффициенты α_v вычисляются по формуле

$$\alpha_v = \frac{\Delta_v}{\Delta}, \quad v = 0, 1, 2, \dots, \tau, \quad (7.210)$$

где Δ – определитель матрицы $\Phi^T \Phi$, составленной из коэффициентов при α_v :

$$\Delta = \begin{vmatrix} N & \sum_{i=1}^N t_i & \sum_{i=1}^N t_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^N t_i^2 \\ \sum_{i=1}^N t_i & \sum_{i=1}^N t_i^2 & \sum_{i=1}^N t_i^3 & \dots & \sum_{i=1}^N t_i^{\tau+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^N t_i^2 & \sum_{i=1}^N t_i^{\tau+1} & \sum_{i=1}^N t_i^{\tau+2} & \dots & \sum_{i=1}^N t_i^{2\tau} \end{vmatrix}; \quad (7.211)$$

Δ_v – определитель матрицы, полученной из матрицы $\Phi^T \Phi$, где столбец коэффициентов при α_v заменен матрицей-столбцом $\Phi^T X$. Например:

$$\Delta_0 = \begin{vmatrix} \sum x_i & \sum t_i & \dots & \sum t_i^2 \\ \sum t_i x_i & \sum t_i^2 & \dots & \sum t_i^{\tau+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum t_i^2 x_i & \sum t_i^{\tau+1} & \dots & \sum t_i^{2\tau} \end{vmatrix}. \quad (7.212)$$

Для осуществления решения (7.210) необходимо, чтобы матрица Δ была неособенной, т.е. чтобы определитель (7.211) не был равен нулю.

При вычислении определителей вида (7.211) и (7.212) надо рассчитать значение сумм $\sum t_i \sum t_i^2 \dots \sum t_i^{2\tau}$. Если за начало отсчета взять середину интервала сглаживания, то вычисление определителей значительно облегчится. Для этого введем новую переменную

$$\tau_i = t_i - \varepsilon_0,$$

где τ_0 – центр интервала сглаживания.

Тогда нижний и верхний пределы суммирования соответственно окажутся равными:

$$-0,5(N-1) = 0,5(N-1), \quad (7.213)$$

если взять четное $N = 0$ число точек в интервале сглаживания.

В большинстве случаев внешнетраекторные измерения регистрируются с постоянным интервалом дискретности d . Выполнение этих условий приводит к тому, что суммы вида (7.211) нечетных степеней оказываются равными нулю, т.е.

$$\sum_{0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} \tau_i = 0; \quad \sum_{0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} \tau_i^3 = 0, \dots \quad (7.214)$$

Значение d можно вынести за знаки сумм. Тогда остается вычислить лишь суммы четных степеней натурального ряда чисел:

$$d^2 \sum_{i=0,5(1-N)}^{i=0,5(N-1)} i^2; \quad d^4 \sum_{i=0,5(1-N)}^{i=0,5(N-1)} i^4, \dots$$

Приведем пример расчета значений α_v при $r=1$.

Используя уравнения (7.210), (7.211), (7.212), находим

$$\alpha_0 = \frac{\Delta_0}{\Delta}; \quad \alpha_1 = \frac{\Delta}{\Delta},$$

где

$$\begin{aligned} \Delta &= \left\| \begin{array}{cc} N & 0 \\ 0 & \sum_{0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} i_i \end{array} \right\| = d^2 N \sum_{i=0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} i^2; \\ \Delta_0 &= \left\| \begin{array}{cc} \sum_{0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} x_i & 0 \\ d \sum_{0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} ix_i & d^2 \sum_{0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} i^2 \end{array} \right\| = d^2 \sum_{0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} i^2; \\ \Delta_1 &= \left\| \begin{array}{cc} N & \sum_{0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} ix_i \\ 0 & \sum_{0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} ix_i \end{array} \right\| = Nd \sum_{0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} ix_i. \end{aligned}$$

Известно, что

$$\sum i^2 = \frac{1}{12} N (N^2 - 1).$$

Окончательно при $r=1$ значения коэффициентов аппроксимирующего полинома определяются по формулам

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} x_i; \\ \alpha_1 &= \frac{12 \sum_{i=0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} ix_i}{N(N^2-1)d}.\end{aligned}\quad (7.215)$$

Аналогично находят формулы для определения коэффициентов, многочленов более высоких степеней. Приведем без вывода такие формулы для многочленов по вторую степень включительно:

$\tau=0$;

$$\alpha_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} x_i; \quad (7.216)$$

$\tau=1$;

$$\alpha_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} ix_i; \quad \alpha_1 = \frac{12 \sum_{i=0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} ix_i}{N(N^2-1)d};$$

$\tau=2$;

$$\alpha_0 = \frac{15 \sum_{i=0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} \left[0,05(3N^2-7) - i^2 \right] x_i}{N(N^2-4)};$$

$$\alpha_1 = \frac{12 \sum_{i=0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} ix_i}{N(N^2-1)d};$$

$$\alpha_2 = \frac{15 \sum_{i=0,5(1-N)}^{0,5(N-1)} (12i^2 - N^2 - 1) x_i}{N(N^2-1)(N^2-4)d^2}.$$

При решении систем высоких порядков используют приближенные методы вычислений.

Перейдем к оценке остаточных ошибок сглаживания измерений наименьших квадратов.

7.7. Ошибки сглаживания методом наименьших квадратов

Остаточную погрешность аппроксимации в соответствии с причинами ее возникновения можно разделить на две составляющие:

1) при вычислении коэффициентов a_v за счет того, что используются случайные значения измерений $x_1, x_2, \dots, x_N$ появляется случайная составляющая ошибки определения a_v , а следовательно, и оценки параметра траектории;

2) выбранная степень полинома r на участке сглаживания может не соответствовать действительной, т.е. оцениваемый параметр может изменяться в соответствии с полиномом другой степени, причем истинный порядок многочлена, например, для маневрирующих объектов, летящих в возмущенной среде, заранее неизвестен. Этот факт приводит к появлению так называемой динамической составляющей ошибки аппроксимации.

Рассмотрим подробнее каждую составляющую.

Случайная ошибка. При ориентировке в выборе нужной оценки воспользуемся для оценивания σ^2 методом максимального правдоподобия. Эту оценку обозначим через ε^2 . Полагаем, что выполняются условия (7.190). Тогда в соответствии с правилом метода максимального правдоподобия составим уравнение

$$\frac{d \ln L}{d \sigma^2} = -\frac{N}{2 \varepsilon^2} + \frac{P}{2 \varepsilon^2} \sum_{i=1}^N \left(x_i - \sum_{v=0}^{\tau} a_v t_i^v \right) = 0,$$

отсюда

$$\varepsilon^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \left(x_i - \sum_{v=0}^{\tau} a_v t_i^v \right)^2}{N}.$$

Ясно, что здесь a_v – оценки, полученные уже по методу наименьших квадратов. Можно показать, что полученная формула дает смещенную оценку ε^2 , несмещенная же оценка определяется формулой

$$\varepsilon^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \left(x_i - \sum_{v=0}^{\tau} a_v t_i^v \right)^2}{N - \tau - 1}. \quad (7.217)$$

Можно получить выражения для оценок остаточных погрешностей. Например, при $\tau = 1$

$$\varepsilon^2 = \sigma^2 \frac{12}{N(N^2 - 1)} + \frac{1}{M},$$

при $\tau = 2$

$$\varepsilon^2 = \sigma^2 \frac{180 \sigma^n - 18 (N^2 - 1) d^2}{N(N^2 - 1)(N^2 - 4) d^4} + \frac{3(3N^2 - 7)}{4M(M^2 - 1)}.$$

По такого рода формулам можно подсчитать зависимость случайной ошибки аппроксимации от величины интервала сглаживания, т.е. от числа измерений N .

Известно, что с увеличением числа измерений при постоянной степени аппроксимирующего полинома случайная ошибка уменьшается. Очевидно также, что при фиксированной «памяти» N с увеличением степени τ аппроксимирующего полинома ошибка увеличивается. Это факт подтверждается таблицей. Меняется степень полинома, а число измерений постоянно ($N=100$).

Из приведенных результатов видно, что для повышения точности можно увеличивать память N , однако при постоянной дискретности поступления данных измерений это приводит к увеличению аппроксимируемого участка траектории, а следовательно, и увеличению степени полинома. Поэтому практике обработки ищут компромиссное решение, т.е. выбирают такие оптимальные значения N и τ , при которых достигается наивысшая точность сглаживания. При этом степень полинома обычно берут не выше 4-го порядка.

Динамическая ошибка. При аппроксимации измерений параметров траектории ракет и космических аппаратов вследствие разного рода возмущений практически невозможно указать заранее степень аппроксимирующего многочлена. Динамическая ошибка возникает за счет несоответствия выбранного полинома истинному характеру изменения аппроксимируемой функции. Рассмотрим суть этого вопроса.

Пусть имеется функция $x(t)$, подлежащая представлению полиномом $g(t)$. Вследствие инерции движущегося тела $x(t)$ непрерывна на интервале $0,5d(1-N)$, $0,5d(N-1)$. Предположим, что она имеет производные до $(\tau+1)$ включительно. Тогда $x(t)$ может быть разложена в ряд Маклорена по степеням аргумента t :

$$x(t) = x(0) + \frac{x^{(1)}(0)}{1!} t + \dots + \frac{x^{(\tau)}(0)}{\tau!} t^\tau + \frac{x^{(\tau+1)}(\theta t)}{(\tau+1)!} t^{\tau+1}, \quad (7.218)$$

где $0 < \theta < 1$, а t лежит в интервале $[0,5d(1-N), 0,5d(N-1)]$.

Представим эту функцию полиномом степени τ :

$$g(t) = a_0 + a_1 t + \dots + a_\tau t^{\tau-1}. \quad (7.219)$$

Если остаточный член разложения (7.218) равен нулю

$$\frac{x^{(\tau+1)}(\theta t)}{(\tau+1)!} t^{\tau+1} = 0 \quad (7.220)$$

или известно максимальное значение $(\tau + 1)$ -й производной на интервале сглаживания, то может быть произведена оценка динамической ошибки. Однако, в практике внешнетраекторных измерений такого рода информация как правило отсутствует. Поэтому в системах обработки для определения степени аппроксимирующего полинома используются различные статистические методы самонастройки, с помощью которых при заданном интервале N автоматически выбирается степень или при фиксированной степени находится соответствующий интервал сглаживания.

Преимущество метода наименьших квадратов с использованием степенного полинома вида (7.174) состоит в том, что коэффициенты $a_0, a_1, \dots$ обладают непосредственным фактическим смыслом. Это или постоянная составляющая, или скорость, или ускорение и т.д. Существенный же недостаток состоит в том, что если в процессе сглаживания при заданном интервале требуется повысить или понизить степень полинома $g(t)$, приходится заново пересчитывать все коэффициенты a_v , так как изменяется система уравнений, из которой они находятся. От этого недостатка оказывается свободен метод наименьших квадратов, построенный на ортогональных многочленах Чебышева.

8. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

8.1. Состав средств АСМ образцов ВВТ

Основным средством реализации опытно-теоретического метода в части создания виртуальной внешней среды для испытываемых средств ВВТ ПВО была и остается комплексная испытательная моделирующая установка (КИМУ). Вместе с тем, возможности опытно-теоретического метода далеко не исчерпываются и не должны ограничиваться возможностями КИМУ.

Интенсивное развития средств вычислительной техники, информационных технологий, появления нового испытательного оборудования правомерно ставит вопрос о расширении возможностей средств моделирования, придании им новых качеств для решения задач испытаний современных образцов ВВТ ПВО.

Ниже предлагается новый подход к построению моделирующей базы путем создания автоматизированной системы моделирования (АСМ), для чего обосновывается ее состав, варианты комплексного применения основных средств, составляющих АСМ, и методология синтеза распределенной комплексной модели внешней среды, запускаемой в решение на средствах АСМ.

В табл. 8.1 приведен перечень средств, которые предлагается включить в состав автоматизированной системы моделирования для проведения испытаний образцов ВВТ.

Наиболее далеко безоблетная технология продвинулась в области испытаний комплексов средств автоматизации (КСА) и автоматизированных систем управления (АСУ) ПВО. Уже на протяжении более чем 30 лет применяется комплексная испытательная моделирующая установка (КИМУ). Прошедшая ряд модернизаций элементной базы и программно-технических решений КИМУ сохранила основные идеологические принципы своего построения.

8.1.1. Комплексная испытательная моделирующая установка

Современный моделирующий комплекс – это аппаратно-программный комплекс (рис. 8.1), который позволяет:

дополнять создаваемые в процессе испытаний группировки ПВО недостающими КСА вышестоящих, нижестоящих и взаимодействующих КП, заменяя их моделями, которые сопрягаются с реальными КСА КП по физическим каналам связи,

Таблица 8.1

Наименование	Характеристика	Область применения	Примеры
Средства полунатурного моделирования			
Исследовательские имитаторы	Аппаратно-программные комплексы, имитирующие физические воздействия на образцы ВВГ или его составные части в процессе боевого применения ВВГ. Моделируют физическую среду с заданным спектром характеристик, в которую помещается опытный образец ВВГ	Проверки, испытания радиоэлектронных средств комплексов, систем с целью оценки конструктивных и программных решений. Варианты воздействия: по эфиру, микширование в приемном тракте, подача цифровой информации в вычислительный комплекс изделия. Испытания ВВГ или составных частей ВВГ на климатiku, на воздействие поражающих факторов ядерного взрыва. Оценка аэродинамических и ресурсных характеристик авиационного и ракетного вооружения	Имитаторы сигналов в целях и помех
Исследовательские моделирующие стенды	Аппаратно-программные комплексы, сопрягаемые с образцом ВВГ и имитирующие: заданную воздушную и наземную обстановку; боевые действия средств ПВО, сопряжение с которыми предусмотрено ТТЗ на образец ВВГ; составные недостающие части образца ВВГ	Отладка и проверка математического обеспечения образца ВВГ в части логического сопряжения с внешними, взаимодействующими и управляемыми средствами и решениями функциональных задач. Отладка и проверка МО составных частей образца	Моделирующее средство оборудование
Комплексные испытательные моделирующие установки	Аппаратно-программные комплексы, имитирующие боевые действия средств воздушного нападения и отдельных элементов группировки ПВО, замкнутых на испытываемый образец ВВГ и другие реальные средства ПВО в группировке	Испытания образцов ВВГ в составе группировок ПВО с целью проверки совместного функционирования, оценки характеристик образца и качества решения выполняемых им функциональных задач	Элементы моделирующих установок, построенные по комплексному методу
Распределенная автоматизированная испытательная система полунатурного моделирования	Система испытательных моделирующих установок, моделирующих стендов и имитаторов, функционирующая по единому замыслу и под единым управлением	Оценка характеристик образца ВВГ по назначению в объеме требований ТТЗ в составе фрагментов группировок ПВО, отличающаяся повышенной достоверностью и точностью	Аналогов не имеется

Продолжение табл. 8.1

Математические модели			
Модели расчета характеристик (первая группа моделей); расчетные; имитационные	Математические модели расчета или оценки характеристик функционирования образца ВВТ, его составных частей, боевых элементов. Расчетные модели базируются на аналитических зависимостях. Имитационные моделируют реальные физические процессы	Исследование характеристик объекта испытаний при изменении условий боевого применения, структуры образца или логики его функционирования. Оценка (уточнение) отдельных частных характеристик образца, процессов управления с учетом результатов натурных и полнатурных экспериментов	Модели систем массового обслуживания Модели расчета условной вероятности поражения цели, уязвимости цели, разлета осколков и изделий, параметров промаха по результатам осмотра остатков мишеней Характеристики на тежесты, зоны обнаружения РЭС и т.д.
Модели расчета эффективности (вторая группа моделей); расчетные; имитационные	Математические модели расчета эффективности боевого применения сил и средств ПВО. Смысл расчетных и имитационных моделей аналогичен предыдущему	Оценка эффективности вариантов боевого применения образца ВВТ в составе группировок ПВО. Прогнозирование результатов боевых действий заданных группировок, зон, районов ПВО	Математическая модель оценки эффективности
Распределенная автоматизированная система моделирования	Автоматизированная испытательная система полнотурного моделирования, объединенная с комплексом математических моделей по принципу взаимной обусловленности и взаимного дополнения	Объединяет области применения всех составных частей системы моделирования	Аналогов не имеется

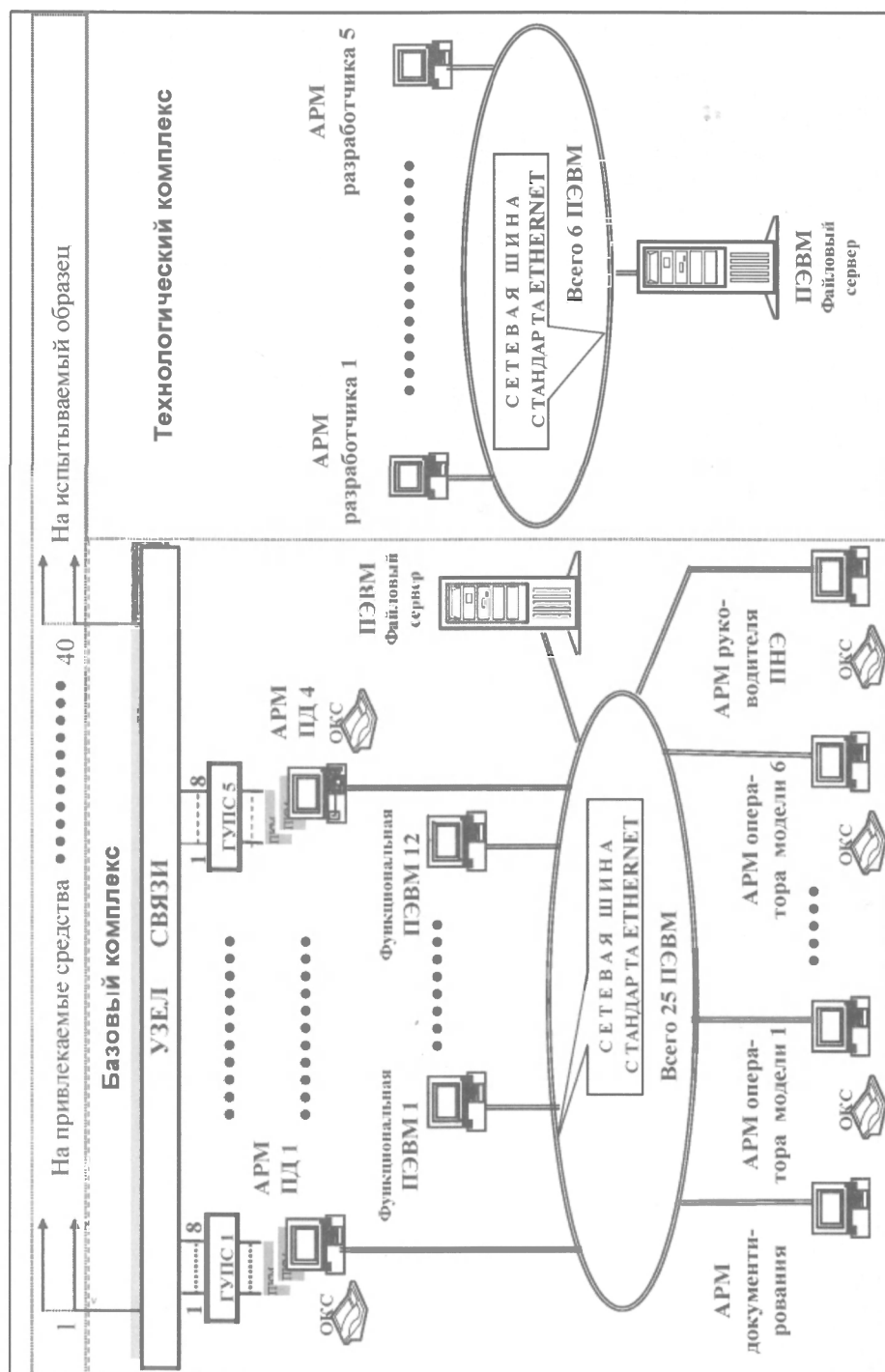


Рис. 8.1. Структурная схема моделирующего комплекса

функционируют в реальном масштабе времени, обмениваются со средствами группировки боевыми распоряжениями и донесениями в соответствии с установленными протоколами функционального взаимодействия между элементами группировки;

создавать в полунатурном эксперименте (ПНЭ) требуемую воздушную обстановку в соответствии с замыслом удара СВН;

моделировать боевые действия радиолокационных средств, зенитных ракетных систем и комплексов, авиации ПВО, имитируемых КП частей и соединений ПВО, ПН, СКП, СПК в соответствии со складывающейся воздушной и наземной обстановкой и распоряжениями реальных КП на ведение боевых действий;

имитировать боевые действия всех моделируемых средств ПВО с соблюдением основных принципов логики работы реальных прототипов.

Задачи, которые решаются с помощью КИМУ, представлены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Этапы отработки КСА, АСУ	Задачи
Комплексная динамическая отладка образцов КСА и АСУ	Сопряжение элементов образца между собой и с внешними абонентами. Отладка функционирования элементов образца. Проверка правильности функционирования образца
Предварительные испытания	Проверка сопряжения образца в соответствии с требованиями ТТЗ. Проверка функционирования боевых алгоритмов образца. Проверка функционирования в условиях максимальной загрузки
Государственные испытания	Проверка функционирования образца в заданном диапазоне боевого применения. Оценка производительности. Проверка функционирования в условиях организованных помех. Оценка качества управления войсками и оружием. Оценка средств документирования и тренажа. Набор статистических данных для оценки характеристик образца с требуемой точностью. Оценка вариантов боевого применения
Типовые испытания	Проверка доработок боевых алгоритмов образца
Исследование боевых возможностей и создание боевых документов	Отработка способов ведения боевой работы. Оценка эффективности образца в различных вариантах группировок. Получение данных при боевой работе образца в экстремальных условиях. Отработка вариантов боевого применения

8.1.2. Испытательные моделирующие стенды

Испытательные моделирующие стенды (ИМС) представляют собой специализированные моделирующие установки, разрабатываемые предприятием-изготовителем для решения задач по отладке ВВТ и подготовке к испытаниям.

Средства тренажа. При проведении наземных проверок образцов ВВТ кроме ПНЭ проводятся еще так называемые «наземные эксперименты». Суть их состоит в том, что ряд вопросов по проверке совместного функционирования, аттестации боевых программ, по выявлению и устранению недостатков решается с применением штатных средств автономного и комплексного тренажа. В данном случае эти средства выступают в роли моделирующих стендов. Например, при испытаниях АСУ типа «Рубеж», для достижения чистоты летных экспериментов встроенные средства тренажа использовались в качестве модельного дополнения. Часто возникающий разрыв трассы цели при развороте самолета-цели на боевой курс приводил к отсутствию трассы в исходном пункте маршрута. В результате возникавшие временные задержки, обусловленные завязкой новой трассы и неустойчивостью параметров движения ВО на момент завязки трассы, приводили к срыву запланированной временной диаграммы летного эксперимента и, как следствие, к незачетности эксперимента. Поэтому по данному маршруту средствами тренажа запускалась имитированная трасса ВО, по которой начиналась боевая работа, а затем производилось отождествление имитированной и реальной трасс ВО, чем и достигался эффект модельного дополнения.

Средства тренажа ПН типа «Рубеж» были успешно использованы также в качестве моделирующего стенда при ГИ прибора для производства штурманских расчетов. Они позволили имитировать на экране рабочего места штурмана наведения сложную первичную воздушную обстановку.

8.1.3. Испытательные имитаторы

Сфера действия рассмотренных средств полунатурного моделирования на полигонах на сегодняшний день, к сожалению, не охватывает образцы ВВТ ПВО, имеющие в своем составе РЭС, так как именно РЭС являются теми элементами, для испытаний которых в полной мере требуется организация входных воздействий по эфиру. Образовавшаяся ниша может быть заполнена путем использования испытательных имитаторов (ИИ), представляющих собой имитаторы сигналов, которые могут принимать РЭС в условиях боевого применения. По *высокочастотному входу* имеется возможность формирования аналогового сигнала, вводимого в фазированную антенную решетку с заданной фазой для имитации одного угломестного направления прихода отраженного сигнала. Это обеспечивает сквозной контроль аппаратуры РЛС от антенны до системы связи. Возможно формирование и ввод имитационного сигнала в приемный тракт РЛС на промежуточной частоте.

По *цифровому входу* РЛС аппаратура обеспечивает формирование и выдачу независимых имитационных трасс воздушных объектов различных типов (истребитель, вертолет, ракета и т.д.), которые могут маневрировать, объединяться в группы. Каждая трасса может быть запущена повторно без стирания информации по включенной трассе. Имеется возможность оперативно изменять параметры движения ВО (курс, скорость, высоту полета). При запуске всех трасс обеспечивается формирование и выдача имитатором до 170 эхо-пакетов и КТА одновременно. Пространственные характеристики имитации ВО составляют $0...360^\circ$ по азимуту, $0...400$ км по дальности, до 10000 км/ч по скорости, до 100 км по высоте полета.

Аппаратура имитации обеспечивает формирование сигналов активной шумовой помехи, пассивной помехи, несинхронной импульсной помехи и отражений от местных предметов. В части создания имитаторов сигналов целей и помех для испытаний РЭС ЗРК, ЗРС приоритет принадлежит предприятию КРИТ. Разработанный им многофункциональный имитатор сигналов целей и помех (МИСЦП) предназначен для:

- отладки и отработки аппаратуры и боевых программ радиоэлектронных средств ЗРК (ЗРС) в ходе автономных и исследовательских испытаний;

- аттестации аппаратуры и боевых программ РЭС ЗРК (ЗРС) в ходе предварительных, государственных и контрольных испытаний;

- испытаний РЭС в сложных условиях целевой и помеховой обстановки, реализация которой невозможна или крайне затруднительна в натурном эксперименте;

- тренировки боевых расчетов ЗРК (ЗРС) в сложных условиях целевой и помеховой обстановки;

- настрочных работ на РЭС и поиска неисправностей.

Многофункциональный имитатор сигналов целей и помех размещается в дальней зоне формирования диаграммы направленности антенны РЭС. Он принимает по эфиру зондирующие сигналы РЭС, запоминает их несущую частоту с помощью аналогового устройства запоминания частоты, задерживает по времени принятую пачку радиоимпульсов на величину, соответствующую дальности цели, вносит в принятый сигнал доплеровский сдвиг частоты, соответствующий радиальной скорости цели, имитирует угловое перемещение цели, усиливает сформированный сигнал цели и излучает его в направлении РЭС. Управляется МИСЦП от ПЭВМ, посредством которой оператор вводит требуемые полетные задания. Возможно управление МИСЦП из аппаратного контейнера РЭС в случае организации локальной сети.

Многофункциональный имитатор обеспечивает:

- имитацию одной или двух целей,двигающихся по независимым траекториям или одной цели, прикрытой помехой прикрытия или самоприкрытия различных видов. Принципы построения имитатора позволяют, при необходимости, увеличивать число имитируемых целей и постановщиков помех;

- оперативное управление (путем задания оператором на ПЭВМ начальных условий) параметрами сигналов целей (дальность, скорость, азимут, амплитуда) и законами их изменения, а также параметрами помех прикрытия и самоприкрытия (период увода, закон увода, диапазон увода, мощность сигнала, спектральные характеристики);

- фединг сигнала и имитацию его «турбинных» составляющих, а также их изменения в частотной, временной областях и по амплитуде в соответствии с заданными оператором законами;

- имитацию ответных сигналов ЗУР;

- регистрацию внутренних параметров РЭС с использованием ПЭВМ, входящей в состав МИСЦП.

8.1.4. Математические модели

Наряду с методом полунатурного моделирования ключевой составляющей опытно-теоретического метода проведения испытаний образцов ВВТ является математическое моделирование. В практике испытаний используются математические модели пересчета ЭПР целей (для приведения характеристик зоны обнаружения радиолокационных средств к стандартным значениям ЭПР, заданным в ТТЗ), математические модели расчета условной вероятности поражения целей одной ЗУР в заданных точках зоны поражения ЗРК и ряд других моделей.

8.2. Варианты применения средств моделирования в составе АСМ для проведения испытаний образцов ВВТ

8.2.1. Варианты применения КИМУ в составе АСМ

Комплексная испытательная имитирующая установка является единственным инструментом оценки характеристик КСА в экстремальных условиях, в том числе в условиях сложной воздушной обстановки и максимальной загрузки. На рис. 8.2 приведены варианты группировок сил и средств, которые используются в полунатурных экспериментах на испытаниях при оценке ее внешней и внутренней эффективности, причем эти варианты группировок строятся исходя из автономного варианта использования КИМУ, т.е. в схеме эксперимента отсутствуют средства испытания радиоэлектронных средств комплексов и систем, осуществляющих воздействия по эфиру микшированием в приемном тракте РЭС. При таком варианте применения КИМУ обязательным является моделирование боевой работы всех средств ПВО, которые имеют непосредственный контакт с воздушным противником или самолетами ИА. Это означает, что реальные радиолокационные станции и комплексы, зенитные ракетные системы и комплексы, авиационные комплексы и станции передачи команд не могут быть включены в состав группировки при проведении эксперимента с применением КИМУ.

Сегодняшние предельные возможности полигонов по имеющемуся составу привлекаемых реальных средств в ПНЭ приведены на рис. 8.3. Естественно, эти ограничения снижают степень адекватности процессов управления войсками и оружием в ПНЭ. Поэтому по результатам ПНЭ удастся получать только верхние оценки показателей качества управления в системах ПВО. Проблемы сходимости этих оценок и информативности ПНЭ являются основными проблемами при исследовании вопросов применения КИМУ. Практикой проведения летных экспериментов доказано, что наиболее информативными являются эксперименты, в которых не обеспечивается высокое качество радиолокационной информации.

Одним из основных путей повышения качества моделирования в КИМУ является сопряжение КИМУ с многофункциональными имитаторами сигналов целей и помех в целях обеспечения синхронного моделирования как воздействия по эфиру, так и путем подачи цифровой информации в вычислительный комплекс изделия. В процессе сопряжения создается распределенная комплексная модель внешней среды, в которую погружается испытываемый образец для проверки выполнения требований, заданных в ТТЗ.

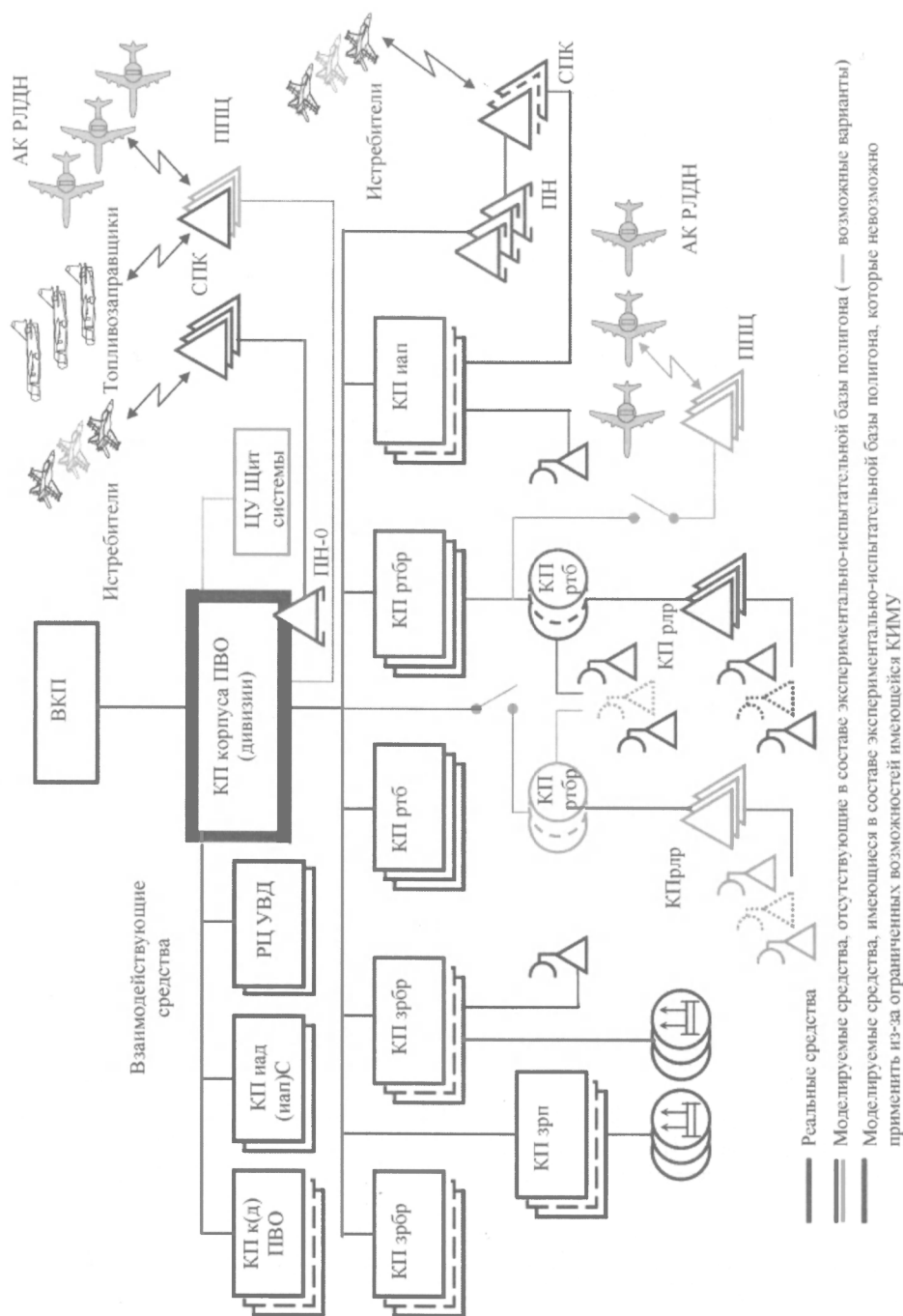


Рис. 8.2. Варианты группировок для оценки эффективности применения КИМУ

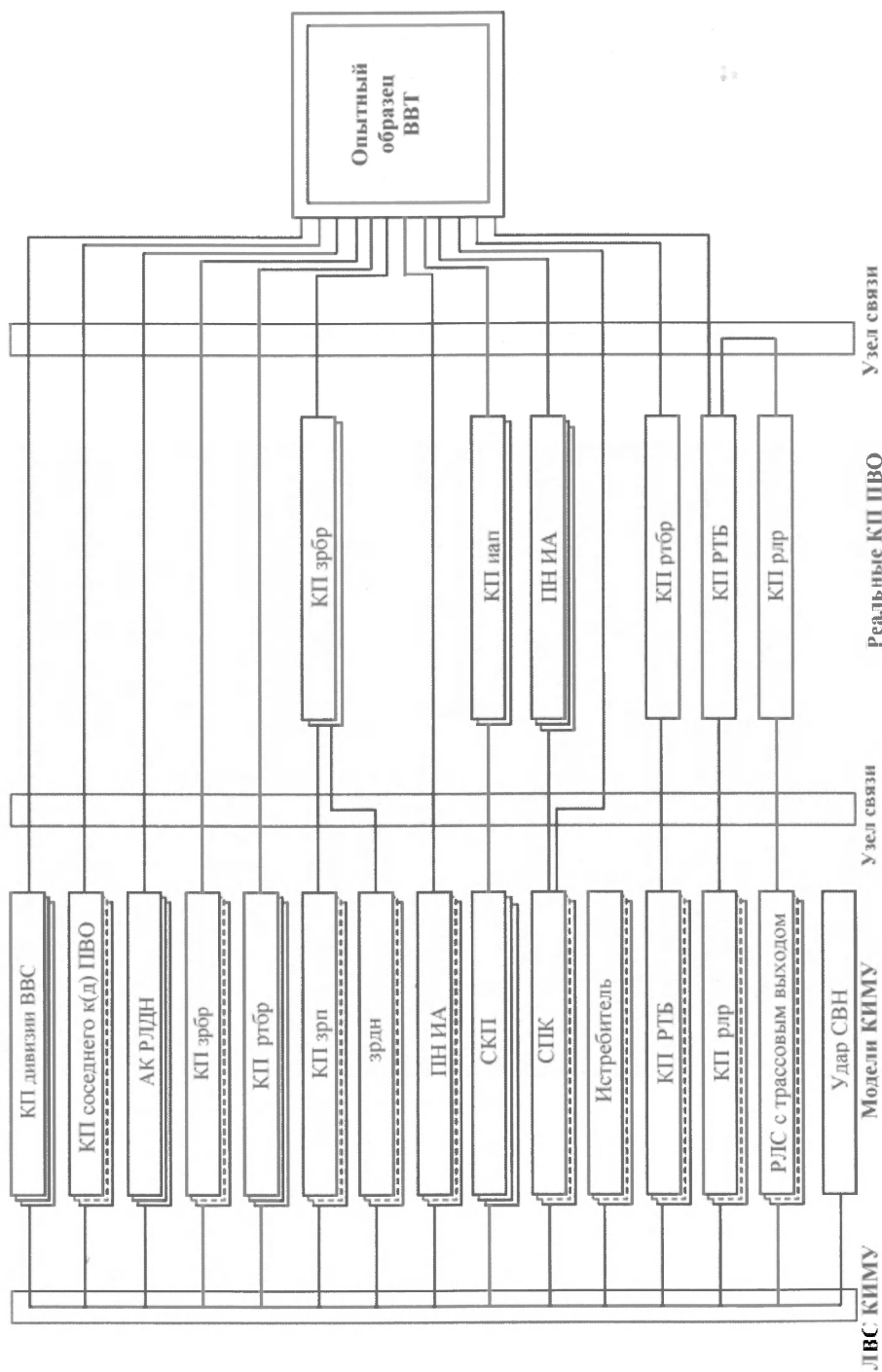


Рис. 8.3. Вариант подключения моделей КИМУ на испытаниях при оценке эффективности

8.2.2. Варианты применения ИМС в составе АСМ

Несмотря на некоторую ограниченность моделирующих стендов, их применение при проведении испытаний ВВТ на полигоне не лишено смысла. Для этого необходимо изменить целевую установку разработки моделирующих стендов, ориентируясь на проблемы испытаний математического обеспечения опытного образца ВВТ, а не на вопросы его отладки. При такой целевой установке моделирующие стенды могут стать органичным дополнением КИМУ в процессе испытаний образцов ВВТ.

Автоматизированное рабочее место испытателя (АРМИ). Функции АРМИ по сравнению с КИМУ ограничиваются задействованием из всей группировки средств только опытного образца ВВТ, а также одного направления обмена с ним;

Развязка по аппаратно-программной среде и системе связи позволяет использовать КИМУ и АРМИ одновременно:

- в независимых экспериментах с разными опытными образцами ВВТ;

- в одном эксперименте с задействованием разных направлений обмена с опытным образцом (в этом случае АРМИ выступает в роли одной из моделей КИМУ, что требует пространственно-временной синхронизации работы АРМИ с работой КИМУ);

Принципиальное различие между АРМИ и КИМУ состоит в разных возможностях по управлению экспериментом. В отличие от КИМУ АРМИ позволяет работать с заранее сформированным магнитофильмом с записью обмена с опытным образцом по заданному направлению.

Исходя из приведенного анализа, можно сделать три важных вывода.

1. При организации несложных проверок стоимость проведения полунатурного эксперимента с использованием АРМИ значительно меньше, чем с задействованием КИМУ.

2. Формируемые моделями КИМУ кодограммы обмена строго соответствуют утвержденным протоколам функционального взаимодействия и не допускают внесения некорректностей, а тем более ошибок в смысловое содержание информации, циркулирующей между моделями и реальными средствами. В то же время одна из целей проверок с АРМИ как раз и состоит в том, чтобы иметь возможность вносить в кодограммы обмена неординарные изменения, соответствующие часто встречающимся ошибкам боевых расчетов взаимодействующих средств, сбоям, отказам и т.д.

3. При использовании АРМИ появляется возможность проведения переоблета, т.е. полного воспроизведения магнитофильма с радиолокационной информацией (РЛИ), зарегистрированного системой объективного контроля при проведении летного эксперимента. Это делает перспективным создание библиотеки магнитофильмов. В таком виде полунатурный эксперимент становится адекватным летному эксперименту.

Последнее положение требует пояснений. Допустим, что на рис. 8.4 схематично изображена картина проводки воздушного объекта (ВО) от исходного до конечного пункта маршрута на одном из источников РЛИ, зафиксированная на его выходе. Пусть ТР1, ТР3 – реальные трассы, ТР4 – дублирующая трасса, ТР2 – реальная трасса с дублирующим участком, ТР6- дублирующая трасса с ложным участком, ТР5 – ложная трасса.



Рис. 8.4. Пример проводки ВО по результатам летного эксперимента

Если кодограммы о воздушной обстановке, привязанные к единому времени, объединить в один магнитофильм, то воспроизводя его на входе КП, который в эксперименте получал эту воздушную обстановку от упомянутого источника РЛИ, мы добьемся эффекта переоблета. При этом можно выбрать другую эталонную трассу ВО и наложить на нее все зарегистрированные трассы TP1–TP6, отложив их от исходного пункта маршрута с учетом ошибок трассовой информации по координатам и скорости (относительно эталона), времени завязки и разрыва трасс, а также размеров радиолокационного поля источника РЛИ. Если иметь банк данных со схемами проводки ВО, то объединяя ряд магнитофильмов в один, можно задать воздушную обстановку на входе КП РТВ, адекватную воздушной обстановке в летном эксперименте с участием нескольких самолетов. Поэтому, если АРМИ применять под управлением КИМУ, то появляется уникальная возможность сочетания реальной воздушной обстановки, заданного тактического фона и загрузки реальных КП при проведении полунатурных экспериментов.

Таким образом, АРМИ не сводится к упрощенной копии КИМУ и является специализированным моделирующим стендом, выполняющим специфические задачи испытаний КСА. Развитие этого направления в создании средств полунатурного моделирования не требует существенных вложений. При определенной организации МО АРМИ оно после сопряжения с КИМУ легко превращается в одну из моделей, дополняющих библиотеку КИМУ, а сама КИМУ становится распределенной с приобретением нового качества в части адекватности полунатурного эксперимента летному.

Средства тренажа. По своим функциям, решаемым задачам, способам сопряжения средства тренажа на испытаниях ВВТ могут применяться в качестве специализированных моделирующих средств. С другой стороны, например, КИМУ также может использоваться как средство тренажа и аттестации войсковых расчетов КП различного назначения и уровня, что было показано на практике.

Схожесть КИМУ со средствами комплексного тренажа, а автономных средств тренажа с испытательными моделирующими стендами может оказаться определяющей при решении вопросов финансирования работ по созданию средств полунатурного моделирования в современных условиях. Определить эти средства мож-

но было путем совершенствования систем автономного и комплексного тренажа, совмещающей функции аппаратуры автономного тренажа и испытательного моделирующего стенда, а также совмещающей разработку средств комплексного тренажа с разработкой специализированных КИМУ.

По аналогичному пути пошли разработчики РЛС, совмещающей функции аппаратуры документирования и средств объективного контроля внутрисистемных параметров, отвечающих требованиям испытаний. При этом перечень регистрируемых параметров, который необходим для объективного контроля при проведении испытаний значительно шире перечня параметров, подлежащих боевому документированию. Он регулируется вводом соответствующих кодов. В рамках создания средств полунатурного моделирования можно использовать такой же подход. В этом случае отпадает необходимость отдельного заказа и разработки средств моделирования для полигонов и, возможно, некоторых моделирующих стендов разработчика. Указанный подход имеет право на реализацию, если затраты на универсализацию средств тренажа оказываются менее высокими по сравнению с отдельным изготовлением средств тренажа и полунатурного моделирования.

8.2.3. Варианты применения ИИ в составе АСМ

На основании анализа принципов построения испытательных имитаторов типа МИСЦП можно рекомендовать следующие основные варианты их применения в ходе полигонных испытаний РЭС в составе АСМ.

Применение МИСЦП в ходе автономных испытаний РЭС ЗРС. Решаемые задачи:

- отладка и отработка аппаратуры, боевых программ и режимов работы РЭС;
- проверка и аттестация аппаратуры, боевых программ и режимов работы РЭС;
- определение и оценка характеристик РЭС.

Схема проведения экспериментов представлена на рис. 8.5. Многофункциональный имитатор сигналов целей и помех обеспечивает имитацию заданной целевой и помеховой обстановки, ПЭВМ управляет работой МИСЦП, регистрирует внутренние параметры РЭС и параметры сигналов РЭС, принятых МИСЦП.

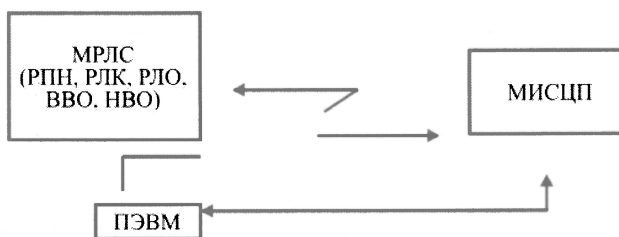


Рис. 8.5. Схема проведения автономных испытаний РЭС

Применение МИСЦП в ходе испытаний радиолинии «РЭС–ЗУР». Решаемые задачи:

- отладка, отработка, проверка и аттестация режимов захвата стартующих ракет, автосопровождения ЗУР на различных этапах наведения, передачи команд управления на ракету;

- отладка, отработка, проверка и аттестация программных и технических мер защиты радиолинии «РЭС–ЗУР» от активных помех;

определение и оценка характеристик радиолинии «РЭС–ЗУР», в том числе ее помехозащищенности.

Схема проведения испытаний представлена на рис. 8.6.



Рис. 8.6. Схема проведения испытаний радиолинии «РЭС–ЗУР»

Многофункциональный имитатор сигналов целей и помех обеспечивает имитацию ответных сигналов ЗУР и создание требуемой помеховой обстановки. Персональная ЭВМ управляет работой МИСЦП, а также регистрирует внутренние параметры РЭС и параметры сигналов РЭС, принятых МИСЦП.

Применение МИСЦП для проверки логического сопряжения КП ЗРС с ЗРК.

Решаемые задачи:

проверка сопряжения КП ЗРС и ЗРК;

проверка логики совместного функционирования КП ЗРС и ЗРК при различных вариантах обнаружения цели и в зависимости от складывающейся помеховой обстановки.

Схема испытаний представлена на рис. 8.7.

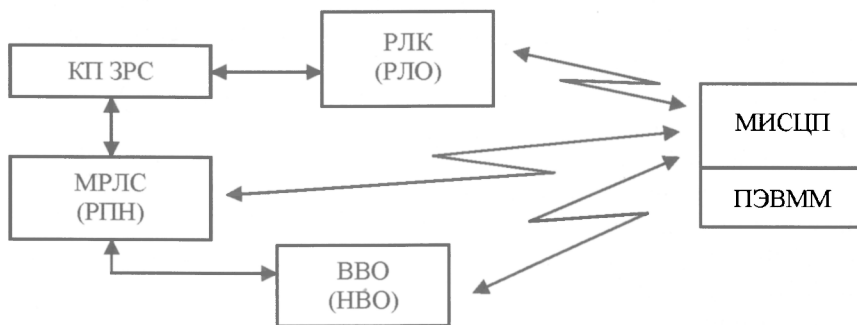


Рис. 8.7. Схема проверки совместного функционирования средств ЗРС

Многофункциональный имитатор сигналов целей и помех имитирует сигнал цели и помехи одновременно для всех РЭС ЗРС. Персональная ЭВМ регистрирует параметры сигналов, принимаемых от РЭС, и внутренних параметров РЭС. Параметры, характеризующие функционирование КП и ЗРК, регистрируются СОК ЗРС.

Впервые в практике испытаний при таком варианте в наземных экспериментах появится возможность оценить характеристики работы ЗРК при получении целеуказаний от собственных средств ЗРС.

Применение МИСЦП в ходе испытаний ЗРС в составе группировки ПВО.

Решаемые задачи:

отработка, проверка и аттестация режимов взаимодействия элементов ЗРС с заданными типами средств из состава группировки ПВО;

определение и оценка характеристик ЗРК (ЗРС) при управлении и целеуказаний от заданных средств из состава группировки ПВО, в том числе максимальной пропускной способности, временных и точностных характеристик в различных условиях целевой и помеховой обстановки.

Для решения второй задачи необходимо наличие в составе КИМУ моделей средств группировки, сопрягаемых с испытываемой ЗРС. МИСЦП работает в режиме управления от КИМУ и имитирует целевые и помеховые сигналы в соответствии с заданным сценарием боевой работы. ПЭВМ обеспечивает регистрацию внутренних параметров РЭС, а также параметров имитируемых сигналов. Средства СОК регистрируют параметры, характеризующие работу КП ЗРС, ЗРК и других средств группировки.

Схема проведения испытаний представлена на рис. 8.8–8.10. Здесь впервые в практике испытаний появляется возможность оценить варианты боевого применения и характеристики ЗРС в наземных экспериментах при получении внешних целеуказаний, в том числе по пеленгам.

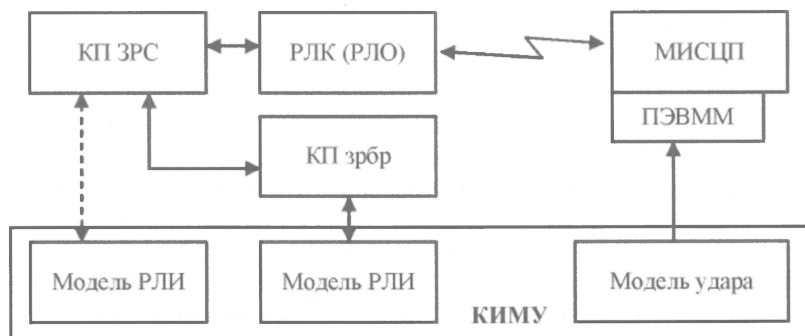


Рис. 8.8. Схема проведения испытаний КП ЗРС в составе группировки ПВО

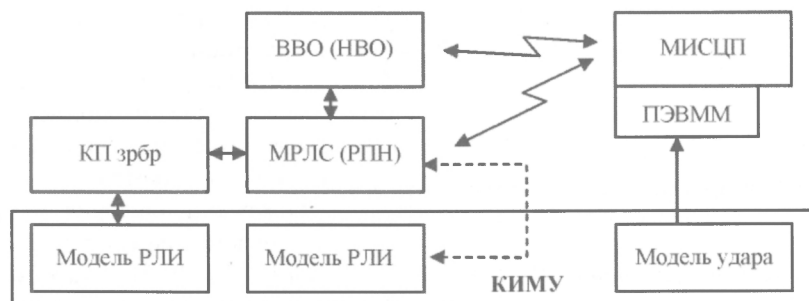


Рис. 8.9. Схема проведения испытаний ЗРК в составе группировки ПВО

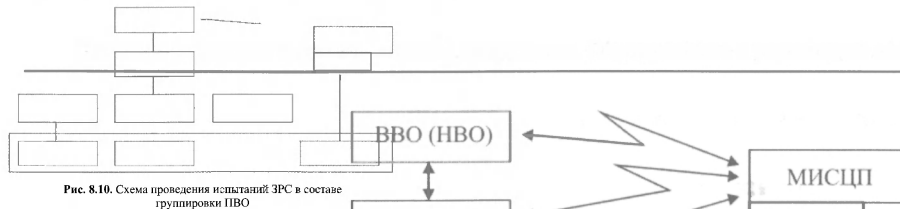


Рис. 8.10. Схема проведения испытаний ЗУР в составе группировки ПВО

Применение МИСЦП в ходе автономных испытаний ЗУР. Для испытаний привлекается ЗУР, доработанная в части сопряжения с аппаратурой регистрации и управления МИСЦП.

Автономные испытания ЗУР с активными ГСН (АГСН) и радиовызывателем (РВ). Решаемые задачи:

- отладка, отработка, проверка и аттестация режимов работы АГСН, РВ по реальному сигналу цели;
- определение и оценка характеристик АГСН, РВ, в том числе характеристик помехозащищенности.

В ходе испытаний АГСН и РВ работают в штатном режиме.

На первом этапе испытаний проводится облет ЗУР самолетом (вертолетом) с целью определения спектральных и временных характеристик отраженного от цели сигнала по результатам записи аппаратурой регистрации МИСЦП сигналов, принятых АГСН и РВ. Результаты записи подвергаются математической обработке, по завершении которой формируется радиокационный образ сигнала цели в спектральной и временной областях для данных условий наблюдения цели. В последующем, в ходе наземных экспериментов с использованием МИСЦП производится

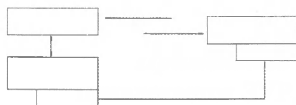
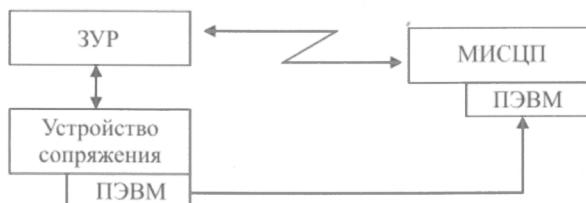


Рис. 8.11. Схема проведения автономных испытаний ЗУР с активными ГСН и РВ

определение и оценка характеристик АГСН и РВ. При этом МИСЦП производит имитацию сигналов цели в соответствии с полученным в ходе облета радиокационным образом сигнала цели в спектральной и временной областях. Схема проведения испытаний представлена на рис. 8.11.

Автономные испытания ЗУР с полупассивными ГСН и РВ. В ходе автономных испытаний ЗУР с полупассивными ГСН и РВ решаются задачи с учетом различий в схеме проведения испытаний, представленных на рис. 8.12.



Для определения и оценки характеристик бортовых РЭС ЗУР одновременно используются спектральные и временные характеристики отраженного от цели сигнала по данным МРЛС (РПН). В ходе облета самолетом (вертолетом) аппаратурой регистрации МИСЦП производится запись цифрового образа приемного устройства МРЛС (РПН) в спектральной и временной областях. После математической обработки в полунатурном эксперименте формируется радиолокационный образ отраженного сигнала для данного типа цели, который после соответствующего пересчета используется для задания программы работы МИСЦП, не только в направлении МРЛС (РПН), но и ЗУР.

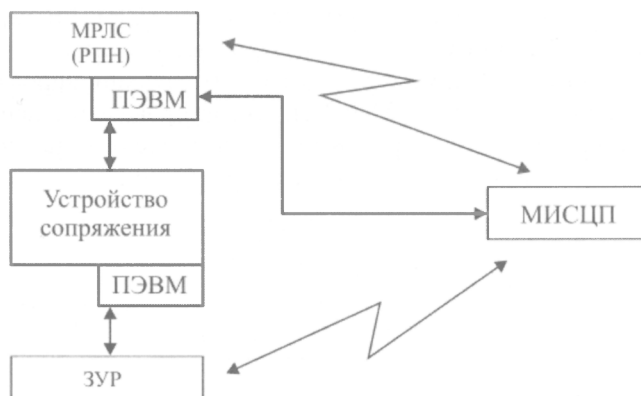


Рис. 8.12. Схема проведения автономных испытаний ЗУР с полуактивными ГСН и РВ

Система объективного контроля МРЛС (РПН) регистрирует сигналы управления ЗУР, координаты полета электронной ЗУР. Сигналы управления подаются на ЗУР через устройство сопряжения, а координаты полета электронной ЗУР – на МИСЦП для формирования взаимной дальности между целью и ЗУР. Чтобы иметь возможность регистрации и обработки необходимых данных в реальном масштабе времени, отраженные сигналы МРЛС и команды на ЗУР можно было бы выдавать в направлении ЗУР с задержкой на один цикл решения задачи наведения. Назовем такой способ моделирования «принципом запаздывающей имитации».

Применение МИСЦП в ходе испытаний контура управления ЗУР. Решаемые задачи:

- отладка, отработка, проверка и аттестация контура управления ЗУР;
- определение и оценка характеристик качества функционирования контура управления ЗУР, в том числе в условиях помех;
- оценка точности наведения ЗУР;
- получение исходных данных для оценки вероятности поражения целей.

В ходе испытаний МРЛС (РПН) РЭС ЗУР работают в штатном режиме. ЗУР имеет телеметрический вариант исполнения. Она обеспечивает прием по эфиру информации от РЭС (по линии передачи команд). МИСЦП формирует отраженный от цели сигнал для МРЛС (РПН) и ЗУР. При этом радиолокационные образы имитируемого сигнала изменяются в зависимости от дальности до цели и ракеты соответственно. Аппаратурой телеметрии ЗУР информация о принятых командах и работе бортового оборудования по эфиру передается на РТС, где производится ее регистрация.

С целью оценки характеристик качества функционирования контура управления и оценки точности наведения используется моделирующий стенд, который имитирует динамику наведения и полет ЗУР. На его вход в реальном масштабе

времени поступает информация с БРП (ГСН), РВ через РТС и следящих систем МРЛС (РПН) от СОК, что обеспечивает максимальное приближение условий проведения оценок к условиям реального функционирования. Выходная информация модели используется МИСЦП. Схема проведения испытаний контура управления ЗУР представлена на рис. 8.13, и, в отличие от остальных вариантов, обладает наибольшей сложностью технической реализации.

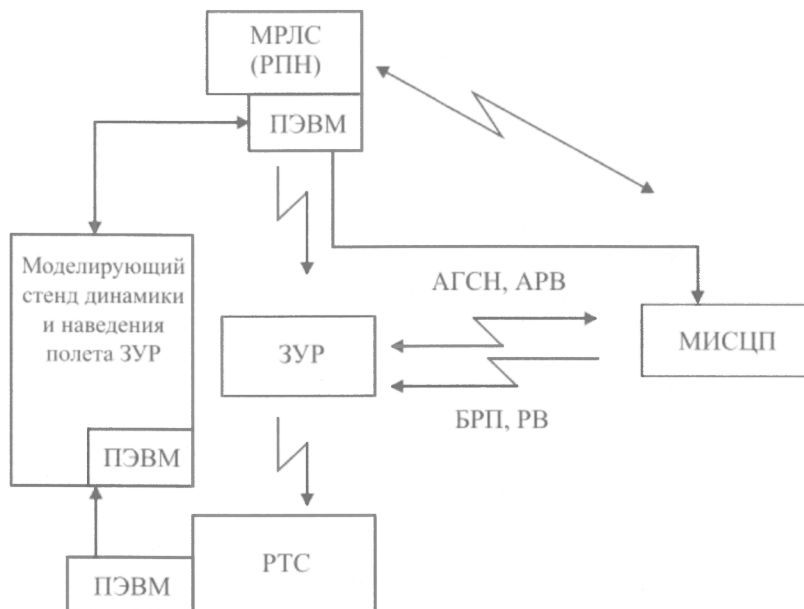


Рис. 8.13. Схема проведения испытаний контура управления ЗУР

Применение МИСЦП для определения и оценки характеристик ЗРС и ее элементов по предложенным вариантам возможно после проведения паспортизации МИСЦП и разработки методологии его применения в ходе испытаний. При этом особое внимание должно быть уделено достижению максимального подобия имитируемого сигнала реальному отраженному сигналу. Необходимо также предусмотреть возможность съема соответствующей информации на элементах ЗРС с целью формирования радиолокационных образов принимаемых ответных сигналов.

Таким образом, анализ технических возможностей МИСЦП по имитации сигналов целей и помех, а также по сопряжению со средствами управления и связи, и по вариантам его применения показывает целесообразность проведения его паспортизации, разработки методологии применения МИСЦП для оценки характеристик ЗРК и ЗРС в условиях проведения полунатурных экспериментов.

По существу имитаторы наподобие МИСЦП успешно могут быть применены и для полунатурных испытаний авиационных комплексов и систем. Здесь просматривается аналогия между ведущим и ведомым в группе истребителей и вариантом боевого применения двух ЗРК, один из которых ведущий, а другой ведомый. По

аналогии с КП ЗРС в этом плане можно рассматривать АК РЛДН. Поэтому рассмотренные варианты применения имитаторов типа МИСЦП вполне пригодны для проведения полунатурных испытаний авиационных комплексов.

Общие принципы построения алгоритма использования МИСЦП в полунатурных экспериментах совместно с моделирующими стендами могут быть следующими:

заданы точки старта, прицеливания, траектория полета БЦ (отсчет времени ведется от момента старта БЦ);

имеется закон изменения эффективной отражающей поверхности БЦ в зависимости от ее ракурса;

имеется конфигурация зоны обнаружения РЛО, снятая на более ранних этапах испытаний;

местоположение МИСЦП и траектория полета БЦ разнесены по азимуту таким образом, чтобы они не попадали в сектор обзора одного полотна антенны РЛО, МИСЦП обеспечивает отслеживание азимута БЦ, идентифицируя свое начальное значение азимута с азимутом точки старта, угол места БЦ задан фиксированным и равным реальному углу места МИСЦП относительно РЛО ε_0 .

Алгоритм формирования магнитофильма на моделирующем стенде.

Шаг 1. Циклически выполняются следующие действия.

Дается запрет на излучение МИСЦП. Фиксируется с необходимой дискретностью направление луча РЛО $\beta^{\text{РЛО}}(t)$, $\varepsilon^{\text{РЛО}}(t)$ и направление на БЦ $\beta^{\text{БЦ}}(t)$, $\varepsilon^{\text{БЦ}}(t)$, решается уравнение

$$(\beta^{\text{РЛО}}(t), \varepsilon^{\text{РЛО}}(t)) = (\beta^{\text{БЦ}}(t), \varepsilon^{\text{БЦ}}(t)) \quad (\beta^{\text{РЛО}}(t), \varepsilon^{\text{РЛО}}(t)) = (\beta^{\text{БЦ}}(t), \varepsilon^{\text{БЦ}}(t))$$

и определяется момент времени t , когда оба направления совпадут с определенной погрешностью. Значения t , $\beta^{\text{РЛО}}(t)$, $\varepsilon^{\text{РЛО}}(t)$, $\beta^{\text{БЦ}}(t)$, $\varepsilon^{\text{БЦ}}(t)$ фиксируются. Момент пуска БЦ принимается за начало отсчета $t = 0$. Если в магнитофильме уже имеется не пустая кодограмма, привязанная к моменту времени t , то она выдается на вход ЦВК КП ЗРС, имитируя отметку о цели, поступающую от РЛО. Выход из цикла по признаку: на предыдущем шаге цикла считана последняя кодограмма из магнитофильма, необходимо добавить очередную кодограмму в магнитофильм, соответствующую моменту времени t . Снимается запрет на излучение МИСЦП.

Шаг 2. При обнаружении зондирующих сигналов МИСЦП возвращает ответные сигналы с учетом амплитуды зондирующих сигналов, расчетного значения эффективной отражающей поверхности БЦ, конфигурации зоны обнаружения РЛО при углах места $\varepsilon^{\text{БЦ}}(t)$, ε_0 , а также дальности до цели. При необходимости имитируется помеха.

Шаг 3. При обнаружении цели РЛО по ответным сигналам МИСЦП регистрируется кодограмма об отметке цели, поступающая на вход ЦВК КП ЗРС после первичной обработки эхо пакета. Эта кодограмма привязывается к моменту времени t , а значение угла места заменяется в ней на $\varepsilon^{\text{БЦ}}(t) + \Delta\varepsilon$, где $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{изм}} - \varepsilon_0$

ошибка измерения угла места МИСЦП. Измененная кодограмма записывается в последовательность кодограмм, которые были уже записаны ранее, при этом факт не обнаружения цели записывается пустой кодограммой. Первая кодограмма в этой последовательности всегда пустая по определению.

Шаг 4. Возвращаемся в исходное состояние, снова осуществляем пуск БЦ и повторяем цикл: шаг 1 – шаг 4. Цикл завершается, когда БЦ приходит в точку прицеливания.

На выходе алгоритма мы будем иметь магнитофильм с имитацией облета РЛО баллистической целью, запись и воспроизведение которого не требует вмешательства в МО РЛО и КП ЗРС. Алгоритм допускает различные модификации. Очевидно, что отслеживание азимута МИСЦП является необязательным, можно также снять все ограничения по траекторным параметрам имитируемой цели. Отсюда следует, что, объединяя в систему моделирующий стенд и имитатор, мы можем получить новое качество, которое недоступно ни одной составляющей этой системы – получить в ПНЭ трассу цели с любыми траекторными параметрами в режиме облета. При этом отпадает необходимость в механическом перемещении передатчика МИСЦП, его местоположение может быть зафиксировано, по крайней мере, для обзорных РЛС.

Кроме наземных имитаторов следует обратить внимание на имитаторы, имеющие воздушное базирование. Простейшим из них является калиброванный имитатор цели с заданной эффективной отражающей поверхностью, выполненный в виде металлической сферы или линзы Люнеберга, которые буксируются метеозондом. Эти имитаторы служат для съема характеристик зоны обнаружения радиолокационных средств безоблетным методом. Наиболее сложными являются летающие лаборатории на базе экономичных самолетов, в состав которых входит система имитаторов. Такие лаборатории используются на испытаниях командных радиолиний управления авиацией и систем государственного опознавания.

В целом имитаторы, специально разрабатываемые для испытаний ВВТ ПВО, имеют широкие перспективы по своему применению, в частности, ими на испытаниях замыкается по эфиру контур полунатурного моделирования с включением в состав воспроизводимой в ПНЭ группировки ПВО практически всех существующих реальных средств ПВО.

Все одновременно работающие имитаторы, моделирующие стенды и подчиненные КИМУ можно объединить, например, под управлением КИМУ-2000.

8.2.4. Варианты применения математических моделей в составе АСМ

При соответствующей калибровке и паспортизации математических моделей, использование их в составе АСМ позволило бы решать ряд задач на различных этапах подготовки и проведения испытаний опытных образцов ВВТ, например, планировать замысел летных и стрельбовых экспериментов, проводить оценку эффективности образцов ВВТ в группировках, вариантов их боевого применения, решать задачи оптимизации структуры и состава группировок ПВО по результатам проведенных полигонных испытаний.

Принимая во внимание факт появления таких разработок как АПК «Спектр», есть необходимость рассмотреть роль и место математических моделей при проведении испытаний образцов ВВТ ПВО, по возможности, провести разграничение задач между математическим и полунатурным моделированием и отследить их взаимодействие в ходе испытаний ВВТ.

Принципиальные отличия математического имитационного моделирования от полунатурного моделирования состоят в следующем:

- математические модели оперируют только с математическим описанием объектов и происходящих с ними процессов;

- моделируемые процессы протекают в нереальном масштабе времени;

- математические модели могут разрабатываться с высокой степенью детализации;

- они обладают относительной простотой внесения изменений в исходные данные, логику функционирования;

- они свободны от ограничений, возникающих из-за необходимости соблюдения жестких требований по форме взаимодействия между собой и с внешней средой, что характерно для полунатурного моделирования;

- дешевизна эксплуатации математических моделей позволяет без особых затрат получать большие объемы однотипных результатов для оценки вероятностных характеристик, решения задач оптимизации состава, структуры и поведения моделируемых объектов;

- создание и совершенствование математических моделей может отличаться очень короткими сроками разработки и отладки программ за счет использования проблемно-ориентированных языков программирования высокого уровня (DELFI, C++Builder и др.), не заботясь об экономии машинных ресурсов. Это непозволительно при разработке моделей реального времени, где программисты вынуждены резко ограничить себя выбором среды программирования (Ассемблер, Watcom C++ и т.д.).

Все это практически недоступно для полунатурного моделирования.

С другой стороны, оперируя только с математическими аналогами объектов, процессов, боевых алгоритмов, невозможно получать достоверные данные о свойствах, недостатках конкретной реализации опытного образца ВВТ, о конкретных значениях его характеристик.

Любая математическая модель всегда отличается от моделируемого образца ВВТ тремя моментами:

- 1) образец ВВТ неизмеримо сложнее любого своего математического аналога;

- 2) образец ВВТ обладает уникальностью исполнения с заранее неизвестными свойствами, реакцией на возмущения и т.д.;

- 3) образец ВВТ является человеко-машинной системой, а интеллектуальные действия боевого расчета неформализуемы.

Эти особенности делают средства полунатурного моделирования в свою очередь незаменимыми при проведении испытаний ВВТ.

Следовательно, взаимодействие между полунатурным и математическим моделированием при проведении испытаний опытных образцов (ОО) ВВТ может и должно осуществляться по двум основным принципам:

- 1) взаимного дополнения по задачам, месту и времени применения;

2) взаимной обусловленности, когда происходит использование результатов работы моделей одного класса для калибровки моделей другого класса или уточнения результатов их работы.

На примере оценки характеристик ЗРК (табл. 8.4) виден общий характер этого взаимодействия в рамках опытно-теоретического метода.

Таблица 8.4

Оцениваемые характеристики	Типы экспериментов				
	Натурные эксперименты			Моделирование	
	Наземные	Облеты	Пуски	ПНЭ	Математическое моделирование
1	2	3	4	5	6
Характеристики поражаемых целей и организованных помех (типы, ЭОП, скорость полета, маневренные возможности, боевые порядки, уровни помех)	+	+	+	+	+
Обеспечение боевой работы ЗРК по информации вышестоящих КП и внешних источников радиолокационной информации	+	+		+	
Обеспечение обстрела целей заданным типом ЗУР одним ЗРК и попарно взаимодействующими ЗРК	+	+	+	+	+
Зоны и эффективность поражения целей заданным типом ЗУР:					
при получении ЦУ от внешних источников, в том числе в условиях помех;	+	+	+	+	
при работе собственных РЭС ЗРК;	+	+	+	+	
при ЦУ от КП ЗРК;	+	+	+	+	
по постановщикам АПП самоприкрытия;	+	+	+	+	
по тактическим, оперативно-тактическим и крылатым ракетам	+	+	+	+	+
Возможность перенацеливания ЗУР	+	+	+	+	
Обеспечение связи	+	+	+	+	
Взаимодействие ЗРК с КП ЗРК	+	+	+	+	
Возможность получения в ЗРК трассовой информации от средств автономного ЦУ	+	+		+	
Сопряжение и взаимодействие КП и ЗРК со средствами радиотехнической разведки	+			+	
Обеспечение непрерывной работы в течение заданного времени	+			+	+
Защита от противорадиолокационных ракет	+	+	+	+	
Управление боевой работой заданных типов ЗРК:					
по ЦУ от вышестоящего КП;	+	+	+	+	
по трассовой информации источников заданных типов	+			+	
Обработка и отождествление информации на КП ЗРК при одновременной работе с несколькими источниками РЛИ	+	+		+	

Продолжение табл. 8.4

1	2	3	4	5	6
Взаимодействие с КП соседних ЗРС, КП соседних збр и нап	+			+	
Приведение средств ЗРС в боевую готовность	+			+	
Обнаружение, завязка трасс и сопровождение заданного числа целей РЭС КП ЗРС и ЗРК: без помех в помехах		+		+	
ЭМС РЭС ЗРС между собой и РЭС ЗРС со средствами группировки	+	+	+	+	+
Обеспечение режимов живучести ЗРС	+	+	+	+	+
Боевая работа ЗРК, ЗРС в условиях максимальной загрузки	+			+	
Одновременное применение ЗУР различных типов	+		+	+	+
Число одновременно обстреливаемых целей ЗРК, ЗРС	+			+	+
Ликвидация ЗУР в аварийных ситуациях			+	+	
Режимы управления РЭС ЗРК и КП	+	+	+	+	
Пересчет координат трассовой информации	+			+	
Варианты боевого применения ЗРК, ЗРС				+	+
Выполнение требований по надежности	+	+	+	+	+
Выполнение требований по эргономике	+	+	+	+	
Характеристики энергообеспечения	+				
Военно-экономическая оценка					+

Из табл. 8.4 видно, что по ряду пунктов возможно одновременное применение полунатурного и математического моделирования. Конкретный порядок использования результатов моделирования должен определяться методиками испытаний при сохранении общего принципа опытно-теоретического метода – основной объем информации накапливается по данным моделирования, а результатами облетов и пусков подтверждается сходимость получаемых оценок. Порядок применения средств полунатурного моделирования (СПНМ), средств математического моделирования (СММ) и их взаимная обусловленность, показаны на рис. 8.14, где наглядно видно разделение по задачам во времени и последовательность взаимодействия, когда очередное применение средств моделирования нежелательно без использования результатов работы СПНМ и СММ на предыдущих этапах.

Рассмотрим процесс взаимной калибровки моделей. Предварительные результаты моделирования таких характеристик, как условная вероятность поражения цели ЗРК (ЗРС), уязвимость данного типа цели, ожидаемые работные времена по фазам боевой работы ЗРС (ЗРК), полином, описывающий полетное время ЗУР, являются исходными данными для калибровки моделей ЗРК (ЗРС) во вновь создаваемых (дорабатываемых) КИМУ. В то же время по результатам ПНЭ для калибровки математических моделей командных пунктов, можно получить такие характеристики, как боевая производительность, временные задержки в прохождении информации и принятия решения, степень учета возможностей имеющегося вооружения, длительность фаз боевой работы в условиях сложной целевой и помеховой обстановки.

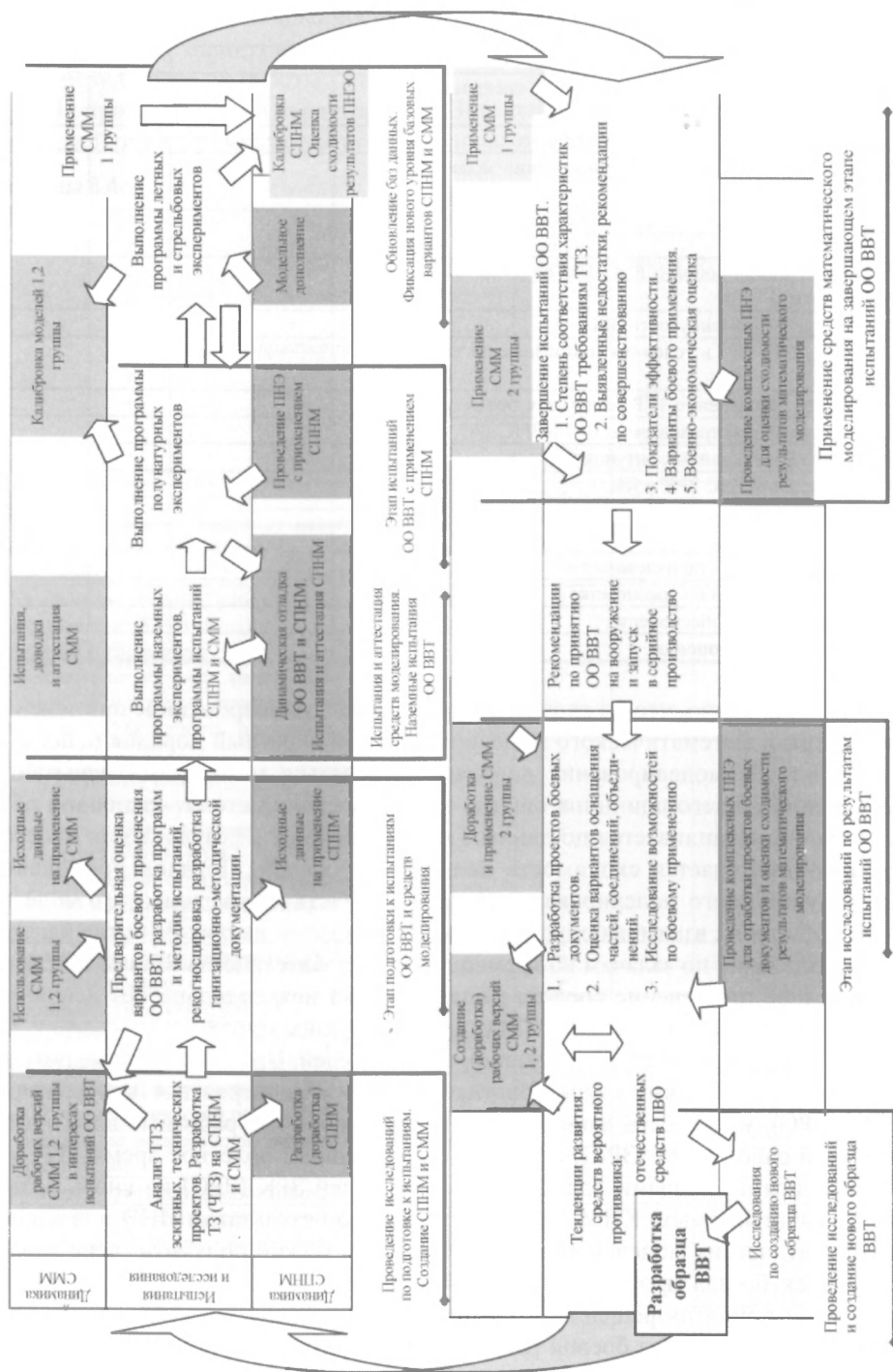


Рис. 8.14. Математическое и полнатурное моделирование в рамках опытно-теоретического метода испытаний образцов ВВТ

На рис. 8.14 видно, что калибровка является в основном последовательной. Имеется единственный этап одновременной калибровки всех СПНМ и СММ 1-й группы после выполнения программы летных и стрельбовых испытаний. Здесь же одновременно должен проводиться этап оценки сходимости результатов ПНЭ по данным натурных испытаний. Наконец, при получении ряда вероятностных показателей на заключительных этапах испытаний опытного образца с помощью СММ, требуется проверка сходимости результатов математического моделирования в отдельных точках факторного пространства. Это возможно путем проведения комплексных ПНЭ.

До сих пор принципы взаимодействия полунатурного и математического моделирования рассматривались, исходя из уже существующей практики. Представляется целесообразным сформулировать еще один принцип – взаимное алгоритмическое дополнение моделей (к сожалению, пока не имеющий прецедентов практической реализации). Идея принципа заключается в том, чтобы обмениваться наиболее удачными алгоритмами, расширяющими возможности описания логики функционирования моделируемых объектов в полунатурных и математических моделях и тем самым повышать их адекватность. Например, понимая, что устойчивость работы АСУ ПВО во многом зависит от качества радиолокационной информации.

Рассмотрение динамики применения средств моделирования показывает их тесную взаимозависимость на протяжении испытаний образца ВВТ. Потребности калибровки и оценки сходимости результатов моделирования вынуждают сосредотачивать по месту проведения испытаний средства моделирования и их разработчиков, по крайней мере, на отдельных этапах испытаний образцов ВВТ.

8.3. Синтез структуры АСМ

Проведенное обоснование состава средств моделирования, которые используются либо могут быть использованы на полигоне, анализ вариантов их применения в составе АСМ позволяют синтезировать структуру АСМ. Она должна представлять собой распределенную систему, включающую в себя автоматизированную испытательную систему полунатурного моделирования (состоящую из ИИ, ИМС, КИМУ), объединенную по принципу взаимной обусловленности и взаимного дополнения с комплексом математических моделей, функционирующую по единому замыслу и под единым управлением (рис. 8.15).

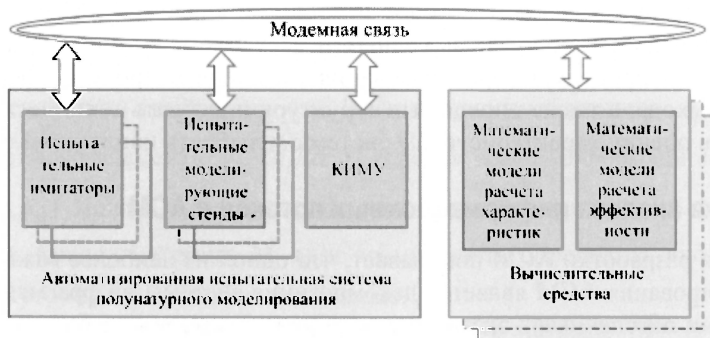


Рис. 8.15. Автоматизированная система моделирования

В основу построения АСМ необходимо положить принципы: структурно-функционального подобия имитационных и физических моделей реальным системам, обеспечения адекватности моделируемых ими информационных потоков и воздействий. Математические модели должны с необходимой степенью достоверности воспроизводить логику функционирования моделируемых средств, информационные процессы в системе, прогнозировать состояние информационной системы обеспечения испытаний.

Автоматизированная система моделирования должна представлять собой комплекс технических и программных средств, функционирующих в реальном масштабе времени. Состав технических средств определяется составом средств, используемых в ИИ, ИМС, КИМУ персональных ЭВМ (для математических моделей) и дополняется аппаратурой, обеспечивающей сопряжение этих средств между собой. Основная трудность при синтезе АСМ будет заключаться в выборе оптимальной структуры программного комплекса и в частности в построении оптимальной распределенной комплексной модели.

Основной особенностью АСМ (в отличии от КИМУ) будет придание АСМ новых качеств по обеспечению возможности физического моделирования и интеллектуальной поддержки опытно-теоретического метода испытаний путем более целенаправленного использования математического моделирования. Новое качество АСМ должна получить в связи с тем, что предполагается ее функционирование по единому замыслу и под единым управлением.

Автоматизированная система моделирования должна представлять собой сложную систему, которая характеризуется, в первую очередь, большим объемом обрабатываемой информации.

Одним из основных этапов разработки распределенной комплексной модели (РКМ) является изучение и анализ процесса обработки данных, циркулирующих в АСМ.

В процессе изучения и анализа должны быть уточнены структура системы, входные, выходные и промежуточные данные, процедуры обработки данных, основные характеристики системы и ограничения на ее реализацию.

Автоматизация изучения и анализа АСМ требует использования формальных моделей, отображающих процесс обработки данных.

Использование моделей и методов изучения и анализа АСМ позволяет: дать формальное описание входных, выходных и всех промежуточных массивов данных; определить процедуры преобразования массивов в процессе формирования требуемого выхода, а также определить структуру и выбрать технические средства системы; дать оценку характеристикам системы и выбрать наилучший ее вариант.

8.4. Методика анализа информационных потоков в АСМ

Анализ опыта разработки АСМ показывает, что одной из наиболее важных задач на этапе проектирования АСМ является декомпозиция системы на фрагменты (подсистемы), которая обеспечивает экстремум заданного критерия разбиения, учитывающего удобство последующего детального анализа, разработки и внедрения.

Рассмотрим совокупность взаимосвязанных матричных и графовых моделей, обеспечивающих формальный анализ и определение характеристик изучаемой АСМ, а также формализованные методы представления результатов изучения и анализа рассматриваемых систем.

Исходными данными для анализа, систематизации и формирования требований к блок-схеме обработки данных разрабатываемой АСМ является информация о парных отношениях между наборами информационных элементов, формализуемая в виде матрицы смежности.

Пусть $D = \{d_1, d_2, \dots, d_S\}$ – множество информационных элементов, где S – их число. Под матрицей смежности **В** понимается квадратная бинарная матрица, проиндексированная по обеим осям множеством информационных элементов и содержащая 1 в позиции (i, j) , $i, j = \overline{1, S}$, если между информационными элементами d_i и d_j существует отношение R_0 , такое, что для получения информационного элемента d_j непосредственно необходимо обращение к информационному элементу d_i . Наличие такого отношения между d_i и d_j обозначается в виде $d_i R_0 d_j$, а отсутствие – $d_i \overline{R_0} d_j$, чему соответствует запись 0 в позиции (i, j) матрицы смежности **В**.

Считается, что каждый элемент достижим из самого себя, т.е.

$$d_i R_0 d_i, \quad i = \overline{1, S}. \quad (8.1)$$

Матрице смежности ставится в соответствие граф информационных взаимосвязей $G(D, R_0)$, множеством вершин которого является множество информационных элементов, а дуга (d_i, d_j) соответствует записи единицы в позиции (i, j) в матрице смежности **В**, т.е. соответствует удовлетворению условия $d_i R_0 d_j$.

Под матрицей достижимости **М** понимается квадратная бинарная матрица, пронумерованная одинаковым образом по осям множеством информационных элементов $D = \{d_1, d_2, \dots, d_S\}$. Запись 1(0) в каждой позиции (i, j) , $i, j = \overline{1, S}$ матрицы достижимости соответствует наличию либо отсутствию для всех упорядоченных информационных элементов (d_i, d_j) отношения достижимости R , обладающего свойством транзитивности. Информационный элемент d_j достижим из информационного элемента d_i ($d_i R d_j$), если на графе информационных взаимосвязей $G(D, R_0)$ можно указать направленный путь от вершины d_i к вершине d_j (либо $i = j$). Анализ матрицы **М** дает возможность определить входные, выходные, промежуточные и обновляемые данные.

Информационные элементы, строки которых в матрице **М** – **Е** не содержат единиц, являются выходными элементами АСМ, а информационные элементы, со-

ответствующие нулевым столбцам матрицы $\mathbf{M} - \mathbf{E}$, являются входными элементами АСМ, $\mathbf{E}$ – единичная матрица вида

$$\mathbf{E} = \|e_{ij}\|,$$

где

$$e_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j \\ 0, & \text{если } i \neq j \end{cases}, \quad i, j = 1, 2, \dots, S. \quad (8.2)$$

Остальные информационные элементы являются промежуточными элементами.

Анализ подмножеств отношений достижимости $\mathbf{M}$ дает возможность определить множество обновляемых информационных элементов.

Пусть $A(d_j)$ – множество предшествования информационного элемента d_j , x – входной информационный элемент АСМ, а x' – обновленная версия x . Тогда, если для информационного элемента

$$y \in A(d_j) \quad xRy \wedge yRx', \quad (8.3)$$

то $x'Ry$, т.е. если x предшествует y и y не предшествует x' , то для получения y следует использовать x' – обновленную версию x .

Взаимосвязь между процедурами обработки данных и информационными элементами отражается с помощью матрицы технологии.

Пусть $P = \{p_\alpha\}$, $\alpha = \overline{1, \overline{P}}$ – множество процедур обработки данных в АСМ. Матрицей технологии обработки данных называется прямоугольная матрица вида $\mathbf{T} = \|t_{\alpha i}\|$, $\alpha = \overline{1, \overline{P}}$, $i = \overline{1, \overline{S}}$, каждый элемент $t_{\alpha i}$, которой удовлетворяет условию

$$t_{\alpha i} = \begin{cases} +1, & \text{если } d_i \text{ является входным элементом процедуры } p_\alpha \\ 0, & \text{если } d_i \text{ не используется процедурой } p_\alpha \\ -1, & \text{если } d_i \text{ является выходным элементом процедуры } p_\alpha \end{cases} \quad \alpha = \overline{1, \overline{P}}; \quad i = \overline{1, \overline{S}}.$$

В матрице $\mathbf{T}$ каждая строка отображает процедуру обработки, а каждый столбец – использование всеми процедурами рассматриваемого информационного элемента. В строке содержится информация о множестве входных и выходных данных, связанных с анализируемой процедурой.

Анализ столбцов позволяет выделить входные и выходные информационные элементы АСМ. Информационный элемент $d_j \in D = \{d_j\}$, $i = \overline{1, \overline{S}}$, является входным, если j -й столбец матрицы $\mathbf{T}$ содержит единственную, отличную от нуля, запись: $t_{\alpha j} = +1$, $\alpha = \overline{1, \overline{P}}$. Если j -й столбец содержит запись $t_{\alpha j} = -1$, $\alpha = \overline{1, \overline{P}}$, то соответствующий информационный элемент $d_j \in D = \{d_j\}$, $i = \overline{1, \overline{S}}$, является выходным.

Обобщенной формой представления взаимосвязей информационных элементов и процедур являются технологические матрицы смежности и достижимости.

Технологической матрицей смежности $\mathbf{B}_T$ называется квадратная бинарная матрица, проиндексированная по обеим осям множеством $D \cup P$. Матрица $\mathbf{B}_T$ имеет четыре подматрицы: $\mathbf{B}$, $\mathbf{B}_I$, $\mathbf{B}_{II}$, $\mathbf{B}_{III}$, проиндексированные соответственно множествами (D, D) , (P, D) , (D, P) , (P, P) . Подматрица $\mathbf{B}$ является матрицей смежности информационных элементов. Ненулевые элементы подматрицы $\mathbf{B}_I$ соответствуют элементам, равным -1 в матрице $\mathbf{T}$, а ненулевые элементы подматрицы $\mathbf{B}_{II}$ соответствуют элементам, равным $+1$ в транспонированной матрице $\mathbf{T}$. Таким образом, элемент (p_α, d_i) , $\alpha = \overline{1, \overline{P}}$, $i = \overline{1, \overline{S}}$, матрицы $\mathbf{B}_T$ равен единице, если и только если d_i является выходным элементом для процедуры p_α , и элемент (d_i, p_α) равен единице, если соответствующий информационный элемент является входным. В противном случае элементы в позициях (p_α, d_i) и (d_i, p_α) равны нулю.

Единичный элемент в позиции (p_α, p_β) , $\alpha, \beta = \overline{1, \overline{P}}$, подматрицы $\mathbf{B}_{III}$ соответствует наличию единичных элементов в позиции (p_α, d_i) подматрицы $\mathbf{B}_I$ и в позиции (d_i, p_β) подматрицы $\mathbf{B}_{II}$, $i = \overline{1, \overline{S}}$, что равносильно существованию информационного элемента d_i , который является входным для процедуры p_β и выходным для процедуры p_α . Считается, что главная диагональ подматрицы $\mathbf{B}_{III}$ заполнена единичными записями.

С использованием технологической матрицы смежности $\mathbf{B}_T$ определяется технологическая матрица достижимости $\mathbf{M}_T$, содержащая подматрицы $\mathbf{M}$, $\mathbf{M}_I$, $\mathbf{M}_{II}$, $\mathbf{M}_{III}$, проиндексированные соответственно множествами (D, D) , (P, D) , (D, P) , (P, P) . Подматрица $\mathbf{M}$ является матрицей достижимости информационных элементов. Подматрица $\mathbf{M}_I$ содержит единичный элемент в позиции (p_α, d_i) , если процедура p_α входит в последовательность процедур, необходимых для получения информационного элемента d_i . Подматрица $\mathbf{M}_{II}$ содержит единичный элемент в позиции (d_i, p_α) , если информационный элемент d_i является входным для последовательности процедур, в состав которой входит процедура p_α . Подматрица $\mathbf{M}_{III}$ является матрицей достижимости процедур обработки данных.

Рассмотренная совокупность матричных и графовых моделей позволяет подготовить информацию, необходимую для последующего синтеза оптимальных РКМ АСМ.

Таким образом, предложена методика анализа информационных потоков для фрагмента АСМ, использование которой позволит определить необходимый и достаточный объем информационного обеспечения фрагмента, входные и выходные данные для фрагмента, порядок включения моделей (процедур обработки данных) для выполнения требуемой последовательности обработки данных.

8.5. Разработка метода синтеза оптимальной распределенной комплексной модели АСМ

8.5.1. Общая схема синтеза оптимальной распределенной комплексной модели АСМ

Исходными данными для постановки и решения задач синтеза оптимальной распределенной комплексной модели (РКМ) являются: множество программ, обеспечивающих решение задач АСМ; множество информационных элементов системы; возможные последовательности выполнения программ в процессе моделирования; взаимосвязи программ с информационными элементами; временные характеристики; состав комплекса технических средств; характеристики комплекса технических средств АСМ.

Результатом решения задачи синтеза является распределенная комплексная модель, запускаемая в решение на программно-техническом комплексе АСМ, обеспечивающая экстремум заданного критерия эффективности. Общая схема решения задачи синтеза оптимальной РКМ представлена на рис. 8.16.

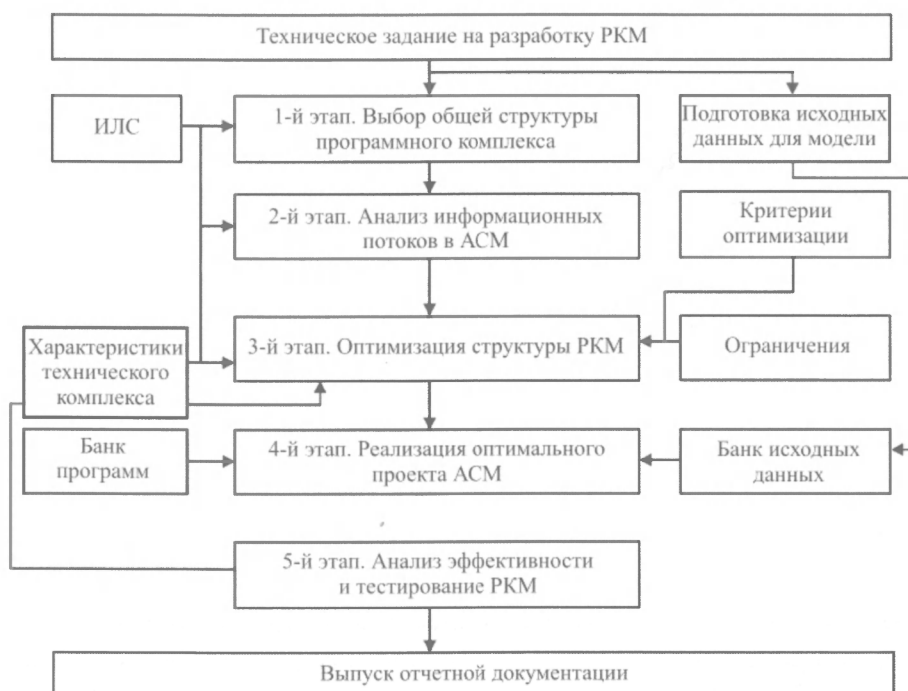


Рис. 8.16. Общая схема решения задачи синтеза оптимальной РКМ

Введем ряд терминов. Специальное программное обеспечение представляет собой набор элементарных моделей.

Элементарная модель (ЭМ) представляет собой самостоятельный процесс, функционирующий под управлением общего программного обеспечения. Каждая

ЭМ предназначена для решения одной либо класса однотипных задач из перечня задач, возлагаемых на АСМ. Модель однозначно описывается тройкой параметров:

$$M = \langle K, C, ИЭ \rangle,$$

где K – класс модели; C – спецификация модели; $ИЭ$ – перечень информационных элементов, связанных с моделью.

Класс модели формально описывается двумя параметрами

$$K = \langle \mathcal{Z}, O \rangle,$$

где $\mathcal{Z}$ – задачи, решаемые моделью; O – ограничения на применение модели.

Спецификация модели содержит информацию, необходимую для организации взаимодействия модели с общим программным обеспечением и другими моделями АСМ. Спецификация представляется следующим образом:

$$C = \langle ИМЯП, ИМЯФ, V_M, B \rangle,$$

где $ИМЯП$ – имя процесса; $ИМЯФ$ – имя файла; V_M – объем исполнимого модуля в байтах; B – условия включения модели.

Имя процесса является уникальным для каждой модели. По этому имени осуществляется взаимодействие модели с другими процессами АСМ.

Имя файла – это имя используемого (загрузочного) файла модели. Для нескольких моделей допускается использование одного загрузочного файла. Например, имеем две модели: модель ПН 70Н6 и модель ПН 5К38. Несмотря на то, что эти модели решают задачи моделирования двух разных систем, много функций у них общих (решение штурманской задачи, обработка воздушной обстановки, управление истребителем-перехватчиком и т.д.). Поэтому для них допускается использование одного загрузочного файла (например, MPN.cpp). В этом случае настройка, т.е. адаптация модели к конкретным условиям, осуществляется с помощью исходных данных.

Условия включения модели представляют собой перечень сообщений, необходимых для активизации процесса. Это могут быть сообщения от ОПО (метки времени, начало работы и т.д.) и сообщения от других моделей (например, уничтожение одного моделируемого объекта другим моделируемым объектом).

Каждый информационный объект, связанный с моделью формально описывается четырьмя параметрами:

$$ИЭ = \langle ИМЯ_3, V_3, Тип_3, Пр_3 \rangle,$$

где $ИМЯ_3$ – имя информационного элемента; V_3 – размер информационного элемента; $Тип_3$ – тип информационного элемента; $Пр_3$ – признак связи $ИЭ$ с моделью.

Если информационный элемент представляет собой переменную или константу, то именем информационного элемента является имя переменной (константы). Тип $ИЭ$ в данном случае определяется как тип переменной (константы). Если информационный элемент есть структура данных, то имя структуры данных является именем информационного элемента. Тип $ИЭ$ определяется как структура.

Признак связи $ИЭ$ с моделью принимает два значения: входной информационный элемент и выходной информационный элемент.

Описания всех моделей сведены в единую базу данных. Информация, хранящаяся в базе данных, представляет собой протокол информационно-логических связей программ (ИЛС) АСМ, которая является основным элементом АСМ, определяющим порядок взаимодействия модели, как с другими моделями, так и с программами ОПО. Он используется и разработчиками моделей и пользователями АСМ. От его полноты и достоверности зависит качество разрабатываемого продукта.

Все разработанные и прошедшие автономную и комплексную отладку модели помещаются в банк программ АСМ.

Ранее уже упоминалось, что для адаптации модели к конкретным условиям применения используются исходные данные. Для каждой модели определяются свои исходные данные. Например, для модели ИАП исходные данные могут включать данные по КП (точка стояния, тип КП и т.д.), данные по аэродромам (точка стояния, число типов ИП на аэродроме, число ИП каждого типа и т.д.), данные по ПН (точка стояния ПН, тип ПН, число каналов наведения) и т.д. Подготовка и формирование исходных данных проводятся специально разработанной программой. Для хранения и выбора подготовленных к использованию исходных данных формируется банк исходных данных.

8.5.2. Выбор структуры программного комплекса

Решение задачи синтеза РКМ начинается с анализа технического задания на разработку РКМ. В техническом задании дается перечень задач, подлежащих решению разрабатываемой системой, определяются условия применения моделей системы. На первом этапе выбирается общая структура программного комплекса АСМ (рис. 8.17)

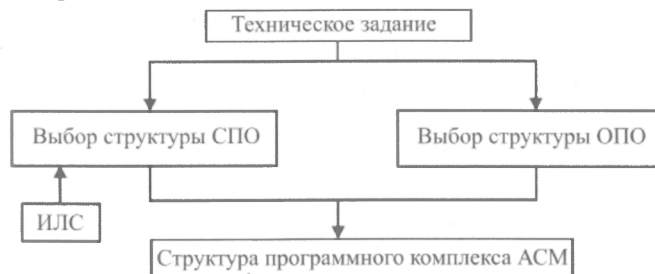


Рис. 8.17. Схема выбора структуры программного комплекса АСМ

Из анализа функциональных задач, решаемых системой, выбирается структура специального программного обеспечения, т.е. перечень моделей, подлежащих включению в состав РКМ. Общее программное обеспечение разделяется на две части: постоянное ОПО и переменное ОПО. Программы, входящие в постоянное ОПО присутствуют в составе программного комплекса всегда (программа организации вычислительного процесса, программа создания и работы с совместно используемой памятью и т.д.) Структура переменного ОПО определяется на этапе выбора структуры программного комплекса исходя из общих задач, решаемых системой.

Например, необходимо разработать систему, решающую задачи моделирования боевых действий группировки ПВО. Система может применяться либо для проведения полунатурного эксперимента с выходом в каналы связи для организа-

ции взаимодействия с реальным испытываемым образцом ВВТ, либо для проведения вычислительного эксперимента (т.е. используются только математические модели). При первом варианте использования системы в структуру программного комплекса АСМ включается программа выдачи информации в канал связи, при втором варианте – данная программа не используется. Следовательно, программа выдачи информации в канал связи относится к переменному ОПО.

Таким образом, проанализировав общие задачи, возлагаемые на РКМ, постоянное ОПО дополняется необходимыми программами переменного ОПО.

Результатом первого этапа является структура программного комплекса, состоящая из программ СПО (моделей) и программ ОПО.

Параллельно с первым этапом определяются исходные данные для моделей. Если необходимые исходные данные отсутствуют в банке исходных данных, то производится подготовка исходных данных и размещение их в банке данных.

8.5.3. Анализ информационных потоков в АСМ

На втором этапе проводится анализ информационных потоков, циркулирующих в АСМ в соответствии с методикой, предложенной в п. 8.4 (рис. 8.18).



Рис. 8.18. Схема анализа информационных потоков АСМ

Исходя из выбранной структуры программного комплекса, определяется множество информационных элементов системы. Данное множество содержит все информационные элементы, входящие в состав описателей выбранных моделей и программ. Для формализации процесса анализа информационных потоков каждому ИЭ из сформированного множества присваивается порядковый номер. В результате имеем множество из S информационных элементов.

Далее проводится построение матрицы смежности **В**. При построении матрицы смежности используем следующее правило: матрица **В** содержит единицу в позиции (i, j) , если информационные элементы с номерами i и j принадлежат описателям одной модели и при этом элемент с номером i является входным ИЭ для модели, а элемент с номером j – выходным. Также единица содержится в позиции (i, j) , если $i = j$.

Предложенное правило построения матрицы смежности несколько отличается от классического правила. Допустим, что ИЭ с номерами 1, 2 являются входными элементами для модели, а ИЭ с номерами 3, 4 – выходными. В этом случае совсем не обязательно, что для получения ИЭ с номером 3 необходимо обращение к ИЭ с номером 1. Но получить элемент 3 можно только в результате работы модели, что в свою очередь требует непосредственного обращения к ИЭ с номером 1. Поэтому предложенное правило не противоречит определению матрицы смежности. Рассмотрим следующий пример. В состав программного комплекса выбраны шесть моделей с номерами $p_1, p_2, \dots, p_6$. Взаимодействие моделей с информационными элементами d_i представлено в табл. 8.5.

Таблица 8.5

Модель	Входящие ИЭ	Выходящие ИЭ
p_1	d_1	d_3 d_2
p_2	d_7	d_5
p_3	d_3 d_2	d_4
p_4	d_5	d_9
p_5	d_4 d_9	d_6 d_8
p_6	d_2 d_9	d_{10}

Для данного случая имеем **матрицу смежности**:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1
3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Граф информационных взаимосвязей, соответствующий матрице смежности представлен на рис. 8.19. Следующим шагом проводится построение матрицы достижимости **М**. Оно связано с определенными трудностями, вызванными наличием множества ветвей графа. Процесс построения матрицы достижимости носит итеративный характер. Процедура построения матрицы достижимости существенно упрощается, если использовать два правила, вытекающих из свойства транзитивности:

1) если для получения информационного элемента j необходимо непосредственно обратиться к элементу i , а для получения элемента k необходимо непосредственно обратиться к элементу j , то элемент k достигим из элемента i ;

2) если элемент k достигим из информационного элемента j , а для получения информационного элемента j необходимо непосредственно обратиться к информационному элементу i , либо информационный элемент j достигим из информационного элемента i , то информационный элемент k достигим из информационного элемента i .

Матрица достижимости строится за два шага.

Шаг 1. Проводится построчный анализ матрицы смежности. Так, в нашем примере для получения информационного элемента три необходимо непосредственно обратиться к информационному элементу один (наличие единицы в позиции (1,3)). Анализируя третью строку матрицы смежности видно, что для получения четвертого информационного элемента необходимо непосредственно обратиться к информационному элементу с номером три (единица в позиции (3,4) матрицы смежности). Следуя первому правилу получаем, что информационный элемент с номером четыре достигим из элемента один (в позицию (1,4) матрицы достижимости записывается единица). Проанализировав все строки матрицы смежности, получаем промежуточную матрицу достижимости.

Промежуточная матрица достижимости

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1
2	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
3	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1
4	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
5	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

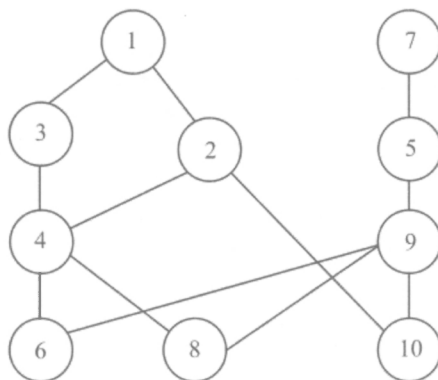


Рис. 8.19. Граф информационных взаимосвязей

Шаг 2. Проводится анализ промежуточной матрицы достижимости по столбцам. В нашем примере шестой элемент достижим из второго элемента (единица в позиции (2,6) промежуточной матрицы достижимости).

Анализируя второй столбец промежуточной матрицы достижимости видно, что второй элемент достижим из первого элемента (единица в позиции (1,2)). Следуя второму правилу, получаем, что шестой элемент достижим из первого информационного элемента. В позицию (1,6) матрицы достижимости записываем единицу. Таким образом получаем матрицу достижимости.

Матрица достижимости

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1
2	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
3	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0
4	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
5	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

При любой разветвленности графа и информационного взаимодействия матрица достижимости строится за два шага, описанных выше.

Построив матрицу достижимости, определяем входные и выходные информационные элементы для системы. В нашем случае очевидно, что ИЭ с номерами 6, 8, 10 являются выходными, а ИЭ с номерами 1 и 7 – входными.

На основании информации из ИЛС, строится матрица технологии **T**.

Матрица технологии T

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	+1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	-1	0	+1	0	0	0
3	0	+1	+1	-1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	+1	0	-1	0	-1	+1	0
5	0	0	0	+1	0	-1	0	-1	+1	0
6	0	+1	0	0	0	0	0	0	+1	-1

Если j -й ИЭ является входным элементом для i -й модели, то в позиции (i, j) матрицы технологии записывается +1. Если j -й ИЭ является выходным элементом для i -й модели, то в позиции (i, j) матрицы технологии записывается -1.

Если j -й ИЭ не используется i -й моделью, то в позиции (i, j) матрицы технологии записывается 0. Следующим шагом является построение технологической матрицы смежностей $\mathbf{B}_T$ по правилам, описанным в п. 8.4.

Подматрица $\mathbf{B}$, проиндексированная (D, D) , где D – множество информационных элементов, является матрицей смежности информационных элементов. Ненулевые элементы подматрицы $\mathbf{B}_I$, проиндексированной (P, P) (где P – множество моделей) соответствуют элементам, равным -1 в матрице технологии $\mathbf{T}$, а ненулевые элементы подматрицы $\mathbf{B}_{II}$, проиндексированной (D, P) , соответствуют элементам, равным $+1$ в транспонированной матрице технологии.

Введем обозначения: $s_{P_\alpha P_\beta}^{III}$ – элемент подматрицы $\mathbf{B}_{II}$, проиндексированной (P, P) ; $s_{\alpha d_i}^I$ – элемент подматрицы $\mathbf{B}_I$; $s_{d_i p_\beta}^{II}$ – элемент полматрицы $\mathbf{B}_{II}$.

Для определения элемента подматрицы $\mathbf{B}_{III}$ используется следующее выражение:

$$s_{P_\alpha P_\beta}^{III} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^S b_{P_\alpha d_i}^I \times b_{d_i p_\beta}^{II} > 0, \quad \alpha, \beta = I, II; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (8.4)$$

где II – число моделей; S – число информационных элементов.

Технологическая матрица смежности

	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
d_1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
d_2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
d_3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
d_4	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
d_5	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
d_6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
d_7	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
d_8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
d_9	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1
d_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
p_1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1
p_2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
p_3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
p_4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1
p_5	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
p_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1

Далее определяем технологическую матрицу достижимости $\mathbf{M}_T$, которая содержит подматрицы $\mathbf{M}$, $\mathbf{M}_I$, $\mathbf{M}_{II}$, $\mathbf{M}_{III}$, проиндексированные соответственно множествами (D, D) , (P, D) , (D, P) , (P, P) . Подматрица $\mathbf{M}$ является матрицей достижимости информационных элементов.

Подматрица $\mathbf{M}_I$ содержит единичный элемент в позиции (p_α, d_i) , если модель p_α входит в последовательность моделей, необходимую для получения информационного элемента d_i . Определим, что между моделями p_α и p_β существует непосредственное взаимодействие, если существует информационный элемент, который является выходным для модели p_α и входным для модели p_β . Тогда, если между моделями p_α и p_β существует непосредственное взаимодействие и элемент d_i является выходным элементом для модели p_β , то очевидно, что модель p_α входит в последовательность моделей, необходимых для получения информационного элемента d_i .

Подматрицу $\mathbf{B}_I$ определим как начальную подматрицу $\mathbf{M}_I$.

Анализируя подматрицу $\mathbf{B}_{III}$ определяем модели, непосредственно взаимодействующие с моделью p_α . Для взаимодействующей модели определяем выходной элемент d_i используя подматрицу $\mathbf{B}_I$. Начальную подматрицу $\mathbf{M}_I$ дополняем единицей в позиции (p_α, d_i) .

В нашем примере с моделью p_1 непосредственно взаимодействуют модели p_3 и p_6 (единицы в позициях (p_1, p_3) и (p_1, p_6) подматрицы $\mathbf{B}_{III}$). Для модели p_3 выходным ИЭ является информационный элемент d_4 (единица в позиции (p_3, d_4) подматрицы $\mathbf{B}_I$), а для модели p_6 – информационный элемент d_{10} . Тогда начальная подматрица $\mathbf{M}_I$ дополняется единицами в позициях (p_1, d_4) и (p_1, d_{10}) . Проанализировав подобным образом все строки подматрицы $\mathbf{B}_{III}$, получаем промежуточную подматрицу $\mathbf{M}_I$.

Промежуточная подматрица $\mathbf{M}_I$

	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}
p_1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1
p_2	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
p_3	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
p_4	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
p_5	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
p_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Для дальнейшего построения подматрицы $\mathbf{M}_I$ используем правило: если модель p_α входит в последовательность моделей, необходимую для получения ин-

формационного элемента d_i , информационный элемент d_j является выходным элементом для модели p_α и модель p_β входит в последовательность моделей, необходимую для получения информационного элемента d_j , то модель p_β входит и в последовательность моделей, необходимую для получения информационного элемента d_i . Проведем анализ промежуточной матрицы $\mathbf{M}_I$ по столбцам и определим, какая модель p_α входит в последовательность моделей, необходимую для получения информационного элемента d_i .

Из матрицы $\mathbf{B}_I$ определяем выходной информационный элемент d_j для модели p_α . Анализируя столбец промежуточной подматрицы $\mathbf{M}_I$ с номером d_j определяем модель p_β , входящую в последовательность моделей, необходимую для получения информационного элемента d_j . Промежуточную подматрицу $\mathbf{M}_I$ дополняем единицей в позиции (p_β, d_i) .

В нашем примере, проанализировав столбец подматрицы $\mathbf{M}_I$ с номером d_8 , определим, что модель p_3 входит в последовательность моделей, необходимую для получения ИЭ d_8 (единица в позиции (p_3, d_8) промежуточной подматрицы $\mathbf{M}_I$). Из подматрицы $\mathbf{B}_I$ определяем, что ИЭ d_4 является выходным для модели p_3 . Рассматривая столбец с номером d_4 промежуточной подматрицы $\mathbf{T}_I$ определяем, что модель p_1 входит в последовательность моделей, необходимую для получения ИЭ d_4 (единица в позиции (p_1, d_4)). Следовательно модель p_1 входит в последовательность моделей, необходимую для получения информационного элемента d_8 . В позицию (p_1, d_8) подматрицы $\mathbf{M}_I$ записываем единицу.

Проанализировав подобным образом столбцы промежуточной подматрицы $\mathbf{M}_I$, получим ее окончательный вид.

Промежуточная подматрица $\mathbf{M}_I$

	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}
p_1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1
p_2	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1
p_3	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
p_4	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
p_5	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
p_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Подматрица $\mathbf{M}_{II}$ содержит единичный элемент в позиции (d_i, p_α) , если информационный элемент d_i является входным для последовательности моделей, в состав которой входит модель p_α . Для построения подматрицы $\mathbf{M}_{II}$ используем два правила.

1. Если между моделями p_α и p_β существует непосредственное взаимодействие и информационный элемент d_i является входным для модели p_α , то информационный элемент d_i является входным для последовательности моделей, в состав которой входит модель p_β .

2. Если информационный элемент d_i – входной для последовательности моделей, в состав которой входит модель p_α и информационный элемент d_j является выходным информационным элементом для модели p_α , тогда, если информационный элемент d_j является входным для последовательности моделей, в состав которой входит модель p_β , то и d_i является входным информационным элементом для последовательности моделей, в состав которой входит модель p_β .

За начальную подматрицу $\mathbf{M}_{II}$ принимаем подматрицу $\mathbf{B}_{II}$. Из матрицы $\mathbf{B}_{III}$ определяем модели p_α и p_β , между которыми существует непосредственное взаимодействие. Из подматрицы $\mathbf{B}_{II}$ находим информационный элемент d_i , который является входным для модели p_α . Подматрица $\mathbf{M}_{II}$ дополняется единицей в позиции (d_i, p_α) .

Для нашего примера из подматрицы $\mathbf{B}_{III}$ определяем, что между моделями p_1 и p_3 существует непосредственное взаимодействие (единица в позиции (p_1, p_3)). Из подматрицы $\mathbf{B}_{II}$ определяем, что информационный элемент d_1 – выходной информационный элемент для модели p_1 (единица в позиции (d_1, p_1)). Подматрицу $\mathbf{M}_{II}$ дополняем единицей в позиции (d_1, p_3) . После анализа всей подматрицы $\mathbf{B}_{III}$ получаем промежуточную подматрицу $\mathbf{M}_{II}$.

Промежуточная подматрица $\mathbf{M}_{II}$

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
d_1	1	0	1	0	0	1
d_2	0	0	1	0	1	1
d_3	0	0	1	0	1	0
d_4	0	0	0	0	1	0
d_5	0	0	0	1	1	1
d_6	0	0	0	0	0	0
d_7	0	1	0	1	0	0
d_8	0	0	0	0	0	0
d_9	0	0	0	0	1	1
d_{10}	0	0	0	0	0	0

Далее для модели p_α из промежуточной подматрицы $\mathbf{M}_{II}$ определяем информационный элемент d_i , который является входным для последовательности моделей, в состав которой входит модель p_α . Из подматрицы $\mathbf{B}_I$ для модели p_α определяем выходной элемент d_j . Из промежуточной подматрицы $\mathbf{M}_{II}$ определяем модель p_β , которая входит в последовательность моделей, для которой информационный элемент d_j является входным. Промежуточную подматрицу $\mathbf{M}_{II}$ дополняем единицей в позиции (d_i, p_β) . Проанализировав подобным образом все столбцы промежуточной подматрицы $\mathbf{M}_{II}$, получаем окончательный вид подматрицы $\mathbf{M}_{II}$.

В нашем примере информационный элемент d_1 является входным для последовательности моделей, в состав которой входит модель p_3 (единица в позиции (d_1, p_3) промежуточной подматрицы $\mathbf{M}_{II}$).

Для модели p_3 выходным будет информационный элемент d_4 (единица в позиции (p_3, d_4) подматрицы $\mathbf{B}_I$). Информационный элемент d_4 является входным для последовательности моделей, в состав которой входит модель p_5 (единица в позиции (d_4, p_5)). Промежуточную матрицу $\mathbf{M}_{II}$ дополняем единицей в позиции (d_1, p_5) . В результате анализа всех столбцов имеем подматрицу $\mathbf{M}_{II}$.

Подматрица $\mathbf{M}_{II}$

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
d_1	1	0	1	0	1	1
d_2	0	0	1	0	1	1
d_3	0	0	1	0	1	0
d_4	0	0	0	0	1	0
d_5	0	0	0	1	1	1
d_6	0	0	0	0	0	0
d_7	0	1	0	1	1	1
d_8	0	0	0	0	0	0
d_9	0	0	0	0	1	1
d_{10}	0	0	0	0	0	0

Подматрица $\mathbf{M}_{III}$ является матрицей достижимости моделей и содержит единицу в позиции (p_α, p_β) , если модель p_β достижима из модели p_α .

Если взаимосвязи между моделями и информационными элементами АСМ представить в виде ориентированного графа технологии обработки данных G_T , то говорим, что модель p_β достижима из модели p_α если на графе технологии обработки можно указать направленный путь от модели p_α к модели p_β .

При построении подматрицы $\mathbf{M}_{III}$ используем два правила.

Правило первое. Если модель p_α непосредственно взаимодействует с моделью p_β , а модель p_β непосредственно взаимодействует с моделью, то модель p_γ достижима из модели p_α .

Правило второе. Если модель p_γ достижима из модели p_β , а модель p_β достижима из модели p_α , то модель p_γ достижима из модели p_α .

За начальную подматрицу $\mathbf{M}_{III}$ принимается подматрица $\mathbf{B}_{III}$, построение которой $\mathbf{M}_{III}$ аналогично построению матрицы достижимости $\mathbf{M}$.

Анализируя начальную подматрицу $\mathbf{M}_{III}$ по столбцам, используя при этом первое правило, строим промежуточную подматрицу $\mathbf{M}_{III}$.

Промежуточная подматрица $\mathbf{M}_{III}$

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
p_1	1	0	1	0	1	1
p_2	0	1	0	1	1	1
p_3	0	0	1	0	1	0
p_4	0	0	0	1	1	1
p_5	0	0	0	0	1	0
p_6	0	0	0	0	0	1

Анализируя промежуточную подматрицу $\mathbf{M}_{III}$ по столбцам, используя при этом второе правило, строим подматрицу $\mathbf{M}_{III}$, которая в данном примере равна промежуточной подматрице достижимости моделей $\mathbf{M}_{III}$. Построив подматрицы $\mathbf{M}$, $\mathbf{M}_I$, $\mathbf{M}_{II}$, $\mathbf{M}_{III}$, получаем технологическую матрицу достижимости.

Технологическая матрица достижимости

	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
d_1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1
d_2	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1
d_3	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
d_4	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
d_5	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
d_6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
d_7	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1
d_8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
d_9	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1
d_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
p_1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1
p_2	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1
p_3	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
p_4	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
p_5	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
p_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1

В общем случае процесс построения матрицы $\mathbf{M}$, подматриц $\mathbf{M}_I$, $\mathbf{M}_{II}$, $\mathbf{M}_{III}$ из промежуточной матрицы $\mathbf{M}$ и промежуточных подматриц $\mathbf{M}_I$, $\mathbf{M}_{II}$, $\mathbf{M}_{III}$ носит итеративный характер. Однако этот процесс можно выполнить за одну итерацию. Для этого необходимо упорядочить информационные элементы и модели перед построением матриц $\mathbf{M}$ и $\mathbf{M}_T$.

Информационные элементы упорядочиваются по номерам в порядке возрастания, начиная с входных информационных элементов.

На первом шаге из матрицы смежности определяются входные информационные элементы, которым присваиваются номера от 1 до N , где N – число входных информационных элементов, а информационным элементам с номерами от 1 до N присваиваются соответствующие номера входных информационных элементов. Корректируются матрица смежности и матрица технологии.

На втором шаге анализируются номера информационных элементов d_i и d_j , где d_i – номер информационного элемента, к которому необходимо непосредственно обратиться, чтобы получить информационный элемент с номером d_j . Если $d_i > d_j$, то информационному элементу с номером d_i присваивается номер d_j , а информационному элементу с номером d_j – номер d_i . Корректируются матрица смежности и матрица технологии.

Второй шаг повторяется до тех пор, пока не будет выполнено условие:

$$d_i < d_j, \quad \forall i, j = \overline{1, S}, \quad (8.5)$$

где S – число информационных элементов в системе.

После завершения упорядочивания номеров информационных элементов выполняется упорядочивание номеров моделей по правилу: выходной информационный элемент с меньшим номером принадлежит модели с меньшим номером. Для этого анализируются информационные элементы в порядке возрастания их номеров.

Если информационный элемент является выходным для какой-либо модели, то этой модели присваивается следующий порядковый номер от 1 до Π , где Π – число моделей в системе, после чего корректируется матрица технологии.

Анализируя технологическую матрицу достижимости, определяются последовательности выполнения моделей. Модели, строки которых в матрице $\mathbf{M}_{III} - \mathbf{E}$ не содержат единицу, являются конечными моделями в последовательности моделей обработки данных, а модели, соответствующие нулевым столбцам матрицы $\mathbf{M}_{III} - \mathbf{E}$, – начальными в последовательностях моделей, где $\mathbf{M}_{III}$ – матрица достижимости моделей, $\mathbf{E}$ – единичная матрица вида $\mathbf{E} = \|e_{\alpha\beta}\|$,

$$e_{\alpha\beta} = \begin{cases} 1, & \text{если } \alpha = \beta \\ 0, & \text{если } \alpha \neq \beta \end{cases}, \quad \alpha, \beta = \overline{1, \Pi}. \quad (8.6)$$

Наличие более одной единицы в строке матрицы взаимодействия моделей $\mathbf{B}_{III}$ указывает на то, что после выполнения модели, соответствующей этой строке

матрицы, процесс обработки данных разветвляется на параллельные процессы (выделяются альтернативные последовательности моделей).

Наличие более одной единицы в столбце матрицы $\mathbf{B}_{III}$ указывает на то, что до выполнения модели, соответствующей этому столбцу, альтернативные последовательности моделей (параллельные процессы обработки данных) должны быть завершены. Строка матрицы $\mathbf{M}_{III}$ определяет последовательность моделей, выполняемую после завершения модели, соответствующей этой строке. Столбец матрицы $\mathbf{M}_{II}$ определяет последовательность моделей, предшествующую выполнению модели, соответствующей этому столбцу.

Таким образом, используя матричный метод анализа информационных потоков, определяем входные и выходные информационные элементы для системы, обновляемые информационные элементы, последовательности моделей, выделяем альтернативные последовательности моделей.

8.5.4. Оптимизация структуры РКМ

На этапе оптимизации структуры программно-технического комплекса АСМ последовательно решаются две задачи:

1. Формирование множества допустимых решений, эффективных по Парето.
2. Выбор оптимального решения на множестве Парето.

Укрупненная схема алгоритма решения первой из перечисленных задач представлена на рис. 8.20.

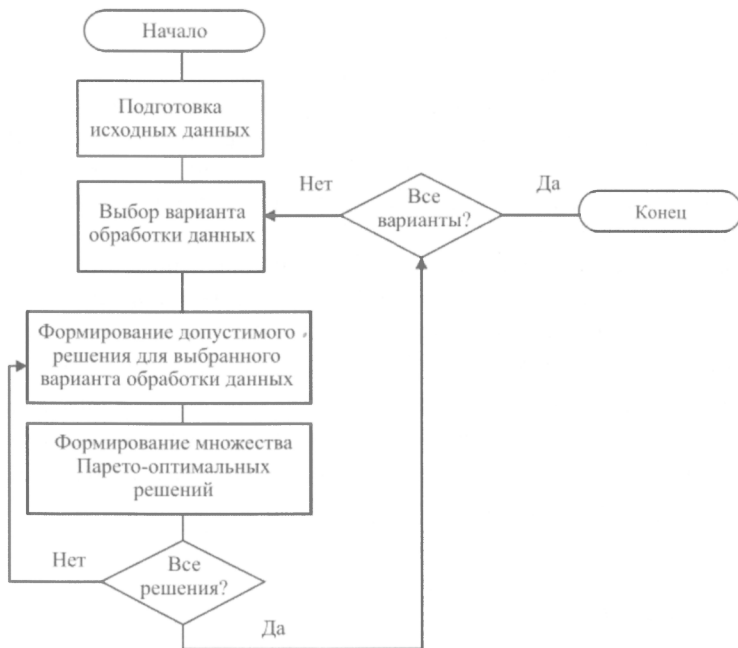


Рис. 8.20. Укрупненная схема алгоритма формирования множества допустимых решений задачи синтеза РКМ, эффективных по Парето

Первым шагом выполняется подготовка исходных данных. По результатам анализа технологической матрицы достижимости, полученной на предыдущем этапе, формируются варианты обработки данных (последовательности выполнения моделей). Альтернативные варианты обработки данных учитываются присвоением каждому варианту соответствующей метки и в дальнейшем рассматриваются независимо.

Для примера рассмотрим граф технологии обработки данных, представленный на рис. 8.21.

Выделяются четыре варианта обработки данных, которые определяются следующими последовательностями выполнения моделей:

первый вариант: 1, 2, 3, 4, 5;

второй вариант: 3, 4, 1, 2, 5;

третий вариант: 1, 3, 2, 4, 5;

четвертый вариант: 1, 3, 4, 2, 5.

В представленной технологии обработки данных выделяются две независимые последовательности моделей: 1, 2 и 3, 4.

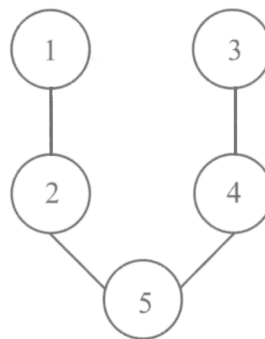


Рис. 8.21. Граф технологии обработки данных

В общем случае под независимой будем понимать последовательность моделей $Z_k(p_{k1}, p_{kn}) = \{p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kn}\}$, для которой выполняются следующие условия: входными информационными элементами для последовательности моделей $Z_k(p_{k1}, p_{kn})$ являются только входные элементы модели p_{k1} ; выходными элементами для последовательности моделей $Z_k(p_{k1}, p_{kn})$ являются только выходные элементы модели p_{kn} .

Применение в качестве технического комплекса АСМ локальной вычислительной сети позволяет выполнять независимые последовательности моделей параллельно на разных узлах сети. Для этого должны быть выполнены два условия: модели, образующие независимую последовательность образуются на одном узле локально-вычислительной сети (ЛВС); разные независимые последовательности реализуются на разных узлах ЛВС.

Кроме очевидного уменьшения времени решения задачи, возлагаемой на АСМ, реализация независимой последовательности моделей на одном узле обеспечивает хранение данных моделей, образующих эту последовательность, на одном узле, что в свою очередь уменьшает время выполнения последовательности моделей за счет исключения передачи данных между узлами ЛВС.

Очевидно, что для удовлетворения условию параллельного выполнения независимых последовательностей моделей, вариант обработки данных не должен допускать разрыва независимых последовательностей. Поэтому первый и второй варианты обработки данных в нашем примере всегда эффективнее третьего и четвертого вариантов, так как третий и четвертый варианты обработки данных изначально предполагают разрывы независимых последовательностей модели.

Таким образом, перед формированием вариантов обработки данных, необходимо выделить независимые последовательности моделей. Определим два типа независимых последовательностей моделей: линейную последовательность и нелинейную последовательность (рис. 8.22).

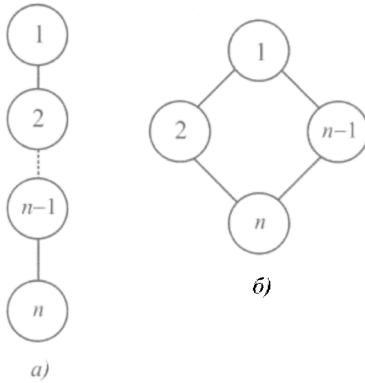


Рис. 8.22. Виды независимых последовательностей моделей:
а – линейная; б – нелинейная

Модели p_α и p_β составляют линейную независимую последовательность моделей если выходные информационные элементы модели p_α являются входными информационными элементами только для модели p_β , и наоборот, входные элементы для модели p_β являются выходными элементами только для модели p_α . Другими словами: модель p_α непосредственно взаимодействует с одной единственной моделью p_β и модель p_β непосредственно предшествует модель p_α .

Из матрицы взаимодействия $\mathbf{B}_{III}$ линейная независимая последовательность определяется следующим образом: модели p_α и p_β образуют линейную независимую последовательность если строка матрицы $\mathbf{B}_{III} - \mathbf{E}$ содержит одну единственную единицу в позиции (p_α, p_β) и столбец матрицы $\mathbf{B}_{III} - \mathbf{E}$ содержит одну единственную единицу в позиции (p_α, p_β) , где $\mathbf{E}$ – единичная матрица вида $\mathbf{E} = \|e_{ij}\|$

$$e_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } i = j, \\ 1, & \text{если } i \neq j, \end{cases} \quad i, j = 1, 2, \dots, \Pi, \quad (8.7)$$

Π – число моделей.

Обозначим элемент матрицы $\mathbf{B}_{III}$ в позиции (p_α, p_β) как $b_{\alpha\beta}^{III}$. Тогда линейная независимая последовательность моделей описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} b_{\alpha\beta}^{III} = 1, \\ \sum_{\beta=1}^{\Pi} b_{\alpha\beta}^{III} = 1, \\ \sum_{\alpha=1}^{\Pi} b_{\alpha\beta}^{III} = 1, \quad \alpha \neq \beta; \quad \alpha, \beta = 1, \Pi. \end{cases} \quad (8.8)$$

Модели $p_1, p_2, \dots, p_{N-1}, p_N$ составляют нелинейную независимую последовательность N моделей если выходные информационные элементы модели p_1 являются входными информационными элементами только для моделей $p_2, \dots, p_{N-1}$, входные информационные элементы для моделей $p_2, \dots, p_{N-1}$ являются выходными только для модели p_1 , выходные информационные элементы моделей $p_2, \dots, p_{N-1}$ являются входными только для модели p_N и входные информационные элементы для модели p_N являются выходными только для моделей $p_2, \dots, p_{N-1}$. Другими словами: модель p_1 непосредственно взаимодействует только с моделями $p_2, \dots, p_{N-1}$, модели $p_2, \dots, p_{N-1}$ – только с моделью p_N , моделям $p_2, \dots, p_{N-1}$ непосредственно предшествует только модель p_N , модели p_N – только модели $p_2, \dots, p_{N-1}$.

Из матрицы взаимодействия моделей $\mathbf{B}_{III}$ нелинейная независимая последовательность моделей определяется следующим образом: строка матрицы $\mathbf{B}_{III} - \mathbf{E}$ содержит $N - 2$ единицы в позициях $(p_1, p_2), \dots, (p_1, p_{N-1})$, строки матрицы $\mathbf{B}_{III} - \mathbf{E}$ с номерами $p_2, \dots, p_{N-1}$ содержат по одной единственной единице в позициях $(p_2, p_N), \dots, (p_{N-1}, p_N)$ соответственно; столбцы матрицы $\mathbf{B}_{III} - \mathbf{E}$ с номерами $p_2, \dots, p_{N-1}$ содержат по одной единственной единице в позициях $(p_1, p_2), \dots, (p_1, p_{N-1})$ соответственно, столбец матрицы $\mathbf{B}_{III} - \mathbf{E}$ с номером p_N содержит $N-2$ единицы в позициях $(p_2, p_N), \dots, (p_{N-1}, p_N)$.

Нелинейная независимая последовательность N моделей описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} b_{p_1, \beta}^{III} = 1, & \alpha + \beta = p_2, \dots, p_{N-1}, \\ b_{\bar{\beta}, p_N}^{III} = 1, & \beta = p_2, \dots, p_{N-1}, \\ \sum_{\alpha=1}^{\Pi} b_{p_1, \alpha}^{III} = N - 2, & \alpha = \overline{1, \Pi} \\ \sum_{\gamma=1}^{\Pi} b_{\gamma, p_N}^{III} = N - 2, & \gamma = \overline{1, \Pi}. \end{cases} \quad (8.9)$$

Алгоритм формирования последовательностей обработки данных состоит из четырех шагов.

На *первом шаге* определяются линейные независимые последовательности моделей. Будем считать, что линейная независимая последовательность может состоять из одной модели, т.е. $Z_k(p_\alpha, p_\alpha)$. За исходную принимается матрица $\mathbf{B}_{III}$. Определяется линейная независимая последовательность моделей и уточняется матрица взаимодействия моделей $\mathbf{B}_{III}$. Для этого строка и столбец матрицы $\mathbf{B}_{III}$ перенумеровываются в Z_k , элементам строки Z_k присваиваются значения элементов строки p_β исходной матрицы $\mathbf{B}_{III}$, а значениям столбца Z_k присваиваются значения элементов столбца p_β исходной матрицы.

За исходную принимается уточненная матрица $\mathbf{B}_{III}$. Данный шаг повторяется до тех пор, пока не будут определены все линейные независимые последовательности моделей, включая и последовательности, состоящие из одной модели.

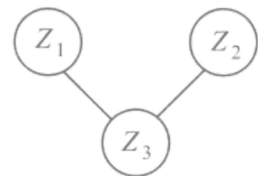
На *втором шаге* определяются нелинейные независимые последовательности моделей и аналогично первому шагу уточняется матрица взаимодействия моделей.

В результате выполнения двух шагов получаем «свернутый» граф технологии обработки данных, вершинами которого являются независимые последовательности моделей.

На *третьем шаге* из полученной в результате первых двух шагов матрицы взаимодействия моделей строится матрица достижимости моделей и определяются варианты обработки данных.

На *четвертом шаге* в полученных вариантах обработки данных независимые последовательности моделей заменяются последовательностями моделей их образующими (независимые последовательности разворачиваются). При этом последовательность выполнения моделей $p_2, \dots, p_{N-1}$, образующих нелинейную независимую последовательность $Z_k(p_1, p_N)$ выбирается в произвольном порядке, так как время выполнения последовательности $Z_k(p_1, p_N)$ не зависит от последовательности выполнения моделей $p_2, \dots, p_N$, а многовариантность распределения моделей обеспечивается на этапе определения допустимых решений задачи синтеза программно-технического комплекса АСМ.

Для технологии обработки данных, представленной графом на рис. 8.23, после выполнения первых двух шагов получаем «свернутый» граф технологии обработки данных и соответствующую матрицу достижимости последовательностей.



	1	2	3
1	1	0	1
2	0	1	1
3	0	0	1

Рис. 8.23. «Свернутый» граф технологии обработки данных и соответствующая ему матрица достижимости последовательностей

Последовательность Z_1 образуется моделями 1, 2; последовательность Z_2 – моделями 3, 4; последовательность Z_3 включает одну модель 5.

Очевидны два варианта выполнения последовательностей Z_k :

вариант 1: Z_1, Z_2, Z_3 .

вариант 2: Z_2, Z_1, Z_3 .

Разворачивая последовательности, получаем следующие два варианта обработки данных:

вариант 1: 2, 3, 4, 5.

вариант 2: 3, 4, 1, 2, 5.

Для каждого из выделенных вариантов обработки данных определяется множество допустимых решений.

Исходя из состава программного комплекса (числа моделей) и технического комплекса (числа ПЭВМ, объединенных в сеть) методом направленного конструи-

рования определяется множество возможных решений задачи синтеза РКМ. Из множества возможных решений выделяется множество допустимых решений.

Допустимым является *решение*, выполняющее ограничения, при которых решается задача синтеза РКМ. Выделяются ограничения, определяемые техническим заданием на разработку РКМ (например, максимальное время выполнения той или иной задачи РКМ) и ограничения, заложенные при разработке общего программного обеспечения (число моделей в составе каждого фрагмента, число информационных элементов, обрабатываемых моделями каждого фрагмента и т.д.).

Для сокращения числа рассматриваемых вариантов решения задачи синтеза РКМ каждое частичное решение проверяется на ограничения на общее число моделей в составе каждого фрагмента, на число информационных элементов, обрабатываемых моделями каждого фрагмента, на сложность интерфейса между фрагментами РКМ, на сложность интерфейса между отдельными фрагментами РКМ.

Если для частичного решения выполняются все ограничения, то выполняется дополнение его до полного решения. В противном случае частичное решение исключается из дальнейшего рассмотрения.

Полученное таким образом возможное решение проверяется на ограничения: на время выполнения отдельной задачи РКМ (t_i), на общее число моделей в составе каждого фрагмента ($\bar{M}$), на число информационных элементов, обрабатываемых моделями каждого фрагмента ($\bar{L}$), на сложность интерфейса между фрагментами АСМ ($\bar{S}$), на сложность интерфейса между отдельными фрагментами РКМ ($\bar{S}_{vv'}$), на однократность включения моделей в состав одного фрагмента, на дублирование информационных элементов в массивах передачи данных ($\bar{K}$), на размер записи каждого массива передачи данных ($\bar{N}$).

Отдельно следует остановиться на таком ограничении, как передача управления из фрагмента до завершения обработки данных всеми моделями фрагмента. Выполнение этого ограничения уменьшает число передач управления фрагменту, так как управление передается один раз для выполнения последовательности моделей, включенных в состав фрагмента возможно, но не обязательно, уменьшится число массивов информации, передаваемых между фрагментами.

Вариант обработки данных определяет только порядок выполнения моделей, а не взаимодействие между моделями. В связи с этим рассматриваемое ограничение не обязательно обеспечивает выполнение независимой последовательности моделей на одном узле (фрагменте), т.е. отсутствие разрывов в последовательности моделей. Так, если в нашем примере для первого варианта обработки данных модели 1, 2, 3 включаются в первый фрагмент, а модели 4, 5 – во второй, ограничение на передачу управления из фрагмента до завершения обработки данных всеми моделями фрагмента выполняется. Однако это решение заведомо хуже, например, решения, определяющего выполнение моделей 1, 2 на первом узле, а моделей 3, 4, 5 – на втором узле, так как это решение поддерживает параллельное выполнение независимых последовательностей моделей, при этом, уменьшая число данных, передаваемых между фрагментами (выходные информационные элементы второй модели в первом решении и выходные информационные элементы второй и третьей моделей). Поэтому

рядку выполнения моделью в последовательности обработки данных, то w_{re} определяется из суммы элементов $b_{\alpha, e}^I$ и $b_{e, \alpha}^{II}$.

Еще одним ограничением, определяемым ОПО, является сложность интерфейса, число переменных, – общих для фрагментов РКМ. Причем, используются ограничения как на сложность интерфейса между всеми выделенными фрагментами РКМ (S), так и на сложность интерфейса между отдельными фрагментами ($S_{vv'}$).

Число переменных, являющихся общими для всех выделенных в процессе решения задачи синтеза РКМ фрагментов определяется как

$$S = \sum_{l=1}^L \sum_{v=q}^{V-1} \sum_{v'=v+1}^V y_{vl} y_{v'l} . \quad (8.15)$$

Интерфейс между заданными фрагментами v и v'

$$\sum_{l=1}^L y_{vl} y_{v'l} . \quad (8.16)$$

Если модель p_{α} , являющаяся начальной моделью независимой последовательности моделей $Z_k(p_{\alpha}, p_{\beta})$, выполняется n -й в общей последовательности выполнения моделей, а модель p_{β} , являющаяся конечной в рассматриваемой независимой последовательности моделей, выполняется m -й в общей последовательности выполнения моделей, то в случае выполнения условия

$$\sum_{r=n}^m x_{rv} (1 - x_{r+1,v}) \leq 1, \quad v = 1, 2, \dots, V. \quad (8.17)$$

мы говорим, что передача управления из фрагмента v не производится до завершения обработки данных всеми моделями независимой последовательности моделей, сформированной на данном узле.

Если l -й информационный элемент является общим для фрагментов v и v' , при этом для модели p_{α} , сформированной на узле v этот информационный элемент является выходным элементом, а для модели p_{β} , сформированной на узле v' , информационный элемент является входным, то формируется массив передачи данных между узлами v и v' , куда записывается l -й информационный элемент.

Введем переменную:

$$w_{rl}^{c(3)} = \begin{cases} 1, & \text{если } l\text{-й информационный элемент является входным (выходным) для } r\text{-й модели,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Для формализации взаимосвязи v -го фрагмента РКМ с l -м информационным элементом введем переменную $y_{vl}^{c(3)}$, которая определяется следующим образом:

$$y_{vl}^{c(3)} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{r=1}^R w_{re}^{c(3)} x_{rv} \geq 1, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Таким образом, переменная $y_{vl}^{c(3)}$ принимает значение, равное единице, тогда и только тогда, когда на v -м узле сформирована r -я модель, для которой l -й информационный элемент является входным (выходным).

Формально условие формирования массива передачи данных с l -м информационным элементом между фрагментами v и v' описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} y_{ve} = 1; \\ y_{v'e} = 1; \\ y_{ve}^3 = 1; \\ y_{ve}^c = 1. \end{cases} \quad (8.18)$$

Будем считать, что массивы передачи данных формируются для каждого информационного элемента и для каждой пары фрагментов. Например, если условие (8.18) выполняется для фрагментов v_1, v_2 и элементов l_1 и l_2 , то между фрагментами v и v' создаются два массива передачи данных с элементами l_1 и l_2 соответственно. Если условие (8.18) выполнимо для фрагментов v_1, v_2 и элемента l , а так же для фрагментов v_1, v_3 и элемента l , то формируются два массива передачи данных с элементом l для передачи между фрагментами v_1 и v_2 , а также между фрагментами v_1 и v_3 .

Степень дублирования l -го информационного элемента

$$K_l = \sum_{f=1}^F r_{ef}, \quad (8.19)$$

где

$$r_{lf} = \begin{cases} 1, & \text{если } l\text{-й ИЭ включается в } f\text{-й массив передачи данных;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Дополнительно может быть задано ограничение на однократность включения отдельных моделей в состав одного фрагмента, т.е.

$$x_{rv} + x_{r'v} \leq 1 \quad (8.20)$$

для заданных моделей p_r и $p_{r'}$, $v=1, 2, \dots, v$.

Таким образом, частичное решение является допустимым, если для него выполняются условия:

$$\begin{cases} M_v \leq \overline{M}, \\ L_v \leq \overline{L}, \\ S \leq \overline{S}, \\ S_{vv'} \leq \overline{S_{vv'}}, \\ K_l \leq \overline{K}, \end{cases} \quad (8.21)$$

где $\overline{M}$ – максимально допустимое число моделей в составе фрагмента; $\overline{L}$ – максимально допустимое число информационных элементов в составе информационного обеспечения v -го фрагмента; $\overline{S}$ – максимально допустимый интерфейс между фрагментами РКМ; $\overline{S_{vv'}}$ – максимальное число общих переменных, обрабатываемых фрагментами v и v' ; $\overline{K}$ – допустимая степень дублирования информационных элементов в массивах передачи данных.

При необходимости для каждой независимой последовательности проверяется ограничение на передачу управления из фрагмента до завершения выполнения всех моделей этой последовательности, а также для заданных моделей проверяется ограничение на однократность их включения в состав одного фрагмента.

Если хотя бы одно из перечисленных ограничений не выполняется, частичное решение из дальнейшего рассмотрения исключается.

При выполнении всех ограничений частичное решение дополняется до полного решения, которое непосредственно проверяется на имеющиеся ограничения.

Так как информационно-управляющие системы являются системами реального времени, важнейшим параметром остается время. Поэтому первым проверяемым ограничением является ограничение на время выполнения задачи РКМ. В случае, когда полное решение удовлетворяет ограничению на время выполнения задач РКМ, осуществляется проверка этого решения на ограничения аналогично проверке частичного решения. Если все ограничения выполняются, полученное решение заносится в массив допустимых решений.

Следующим шагом является формирование множества Парето – оптимальных решений.

Как отмечалось ранее, под множеством Парето – оптимальных решений понимают такое решение, когда ни одно из решений этого множества не может быть заменено другим множеством, более хорошим по какому-либо критерию без того, чтобы не ухудшить решение хотя бы по одному другому критерию.

Рассмотрим критерии, по которым будем формировать множество Парето. Вполне очевидно, что самым важным является время решения задач, возлагаемых на РКМ, однако, здесь необходимо сделать некоторые замечания.

Ввиду возрастающего быстродействия ПЭВМ, уменьшения времени обмена информацией с внешними запоминающими устройствами, время уже не является определяющим. Так, если цикл обработки информации в АСУ ПВО, допустимое время решения задач РКМ составляет 10 с, а время решения задач РКМ составляет

микросекунды, очевидно, что на первый план целесообразно выдвинуть другие критерии: число фрагментов РКМ (число задействованных узлов ЛВС), число передач управления ОПО при организации вычислений, сложность интерфейса и т.д.

Когда же допустимое время обработки информации соизмеримо с временем решения задач РКМ, критерий времени все-таки является определяющим.

Рассмотрим критерии оптимизации структуры РКМ.

Критерий 1. Время решения задач РКМ.

Критерий 2. Число передач управления ОПО, которое включает число передач управления между фрагментами и число передач массивов данных между фрагментами.

Для формализации взаимосвязи фрагментов РКМ и массивов передачи данных введем переменную

$$Z_{vf}^{c(3)} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{l=1}^L y_{vl}^{c(3)} Z_{lf} \geq 1, \\ 0, & \text{если } \sum_{l=1}^L y_{vl}^{c(3)} Z_{lf} = 0. \end{cases} \quad (8.22)$$

Будем полагать, что если $Z_{vf}^3 = 1$, то и $Z_{vf}^c = 1$. Тогда число передач управления ОПО определяется из выражения:

$$\sum_{r=1}^R \sum_{v=1}^V x_{rv} (1 - x_{r+1,v}) \left[1 + \sum_{f=1}^F (Z_{vf}^c - Z_{vf}^3) \right]. \quad (8.23)$$

Критерий 3. Число массивов информации, передаваемых между фрагментами

$$\sum_{v=1}^V \sum_{f=1}^F (Z_{vf}^c - Z_{vf}^3). \quad (8.24)$$

Критерий 4. Интерфейс по используемым информационным массивам

$$\sum_{f=1}^F \sum_{v=1}^{V-1} \sum_{v'=v+1}^V Z_{vf} Z_{v'f}. \quad (8.25)$$

Критерий 5. Интерфейс по используемым информационным элементам

$$\sum_{l=1}^L \sum_{v=1}^{V-1} \sum_{v'=v+1}^V y_{vl} y_{v'l}. \quad (8.26)$$

Формирование множества Парето – оптимальных решений включает три шага.

Шаг 1. Для допустимого решения определяются значения критериев.

Шаг 2. Если множество Парето пустое (рассматривается первое решение), то это решение и значения критериев заносятся в множество.

Шаг 3. Если множество Парето не пустое, рассчитанные критерии сравниваются с критериями решений, которые принадлежат множеству.

Если рассматриваемое допустимое решение не хуже любого решения из множества Парето хотя бы по одному критерию, множество дополняется этим решением. Если множеству Парето принадлежит решение $\{X_i\}$, которое хуже рассматриваемого решения по всем критериям, то решение $\{X_i\}$ исключается из множества Парето – оптимальных решений.

Следующим этапом решается задача оптимизации РКМ. Она представляет собой многокритериальную задачу оптимизации.

Из рассмотренных критериев трудно выделить более или менее важный. Как было уже сказано, даже для такого критерия, как время решения задачи РКМ нельзя сказать, что он является самым важным. Поэтому, для решения поставленной многокритериальной задачи оптимизации используем метод предпочтений. Укрупненная схема алгоритма решения поставленной задачи представлена на рис. 8.24.

Определим следующую предпочтительность удовлетворения критериев:

время решения задачи РКМ;

число передач управления ОПО для организации вычислений;

число массивов информации, передаваемых между фрагментами;

интерфейс по используемым информационным массивам;

интерфейс по используемым информационным элементам;

объем неиспользуемых данных, пересылаемых между фрагментами.

Исходным для задачи оптимизации является множество Парето-оптимальных решений.

С помощью выбранного критерия осуществляется обычная однокритериальная оптимизация и формируется множество вероятно-оптимальных планов R_i по данному критерию. С этой целью для всех решений, образующих исходное множество решений для данного шага оптимизации, рассчитывается значение выбранного критерия. Решения (или решение), обеспечивающие экстремум выбранного критерия образуют множество оптимально-вероятных планов R_i на



Рис. 8.24. Укрупненная схема алгоритма решения задачи оптимизации структуры РКМ

данном шаге оптимизации. Если множество R_i содержит более одного плана, то оно принимается за начальное множество планов для следующего шага оптимизации и проводится оптимизация по следующему выбранному критерию.

В результате решения задачи оптимизации получаем либо оптимальный план $\Pi_{\text{оп}}$, либо множество вероятно-оптимальных планов $R_{\text{оп}}$. Для упрощения дальнейшего описания будем считать, что в любом случае результатом решения задачи оптимизации является множество $R_{\text{оп}}$, которое содержит либо один единственный оптимальный план $\Pi_{\text{оп}}$, либо несколько вероятно-оптимальных планов. Предложенная предпочтительность удовлетворения критериев является условной.

Целесообразно оценить влияние числа передач управления ОПО для организации вычислений на результат решения задачи оптимизации. С этой целью в предложенной иерархии критериев первые два критерия поменяем местами и для полученной последовательности повторим задачу оптимизации. В результате получаем множество $R'_{\text{оп}}$.

Множество оптимальных планов $M_{\text{оп}}$ по всем критериям принадлежит пересечению множеств $R_{\text{оп}}$ и $R'_{\text{оп}}$: $M_{\text{оп}} = R_{\text{оп}} \cap R'_{\text{оп}}$. Если пересечение множеств $R_{\text{оп}}$ и $R'_{\text{оп}}$ пусто, то $M_{\text{оп}}$ является объединением множеств $R_{\text{оп}}$ и $R'_{\text{оп}}$: $M_{\text{оп}} = R_{\text{оп}} \cup R'_{\text{оп}}$. Таким образом, оптимальное решение $\Pi_{\text{оп}}$ принадлежит множеству $M_{\text{оп}}$.

Для любого решения из множества $M_{\text{оп}}$ проводится адаптация на условия, заданные техническим заданием. Этот этап включает адаптацию моделей и адаптацию общего программного обеспечения.

Адаптация моделей – настройка моделей с помощью подготовленных исходных данных, адаптация общего программного обеспечения – подготовка таблиц включения моделей для обеспечения выбранной последовательности моделей, создание массивов передачи данных и таблиц передачи данных.

8.5.5. Реализация оптимальной РКМ

Заключительным этапом синтеза оптимальной РКМ является проверка работоспособности и оценка эффективности полученного решения. Для этой цели используются различные тесты, обеспечивающие работу РКМ в различных режимах.

Если РКМ работоспособна и обеспечивает выполнение задач, возложенных на АСМ, то решение задачи синтеза РКМ считается достигнутым. В противном случае из множества $M_{\text{оп}}$ выбирается следующее решение и для него повторяются предыдущие этапы.

Если в результате ни одно из решений не выбрано, то решения из множества $M_{\text{оп}}$ исключаются из множества допустимых решений, после чего синтез РКМ повторяется с этапа оптимизации структуры РКМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами сделана попытка системного анализа научно-обоснованного подхода к изучению и решению задач теории и практики, дана общая характеристика вооружения и военной техники как объектов исследований.

Процесс создания перспективных образцов ВВТ, относящихся к разряду наукоемкой продукции, включает в себя комплекс работ многочисленных коллективов ученых, конструкторов, производственников, военных. Начиная с момента формирования тактико-технических параметров нового вида вооружения и до выпуска технического задания на его создание, разработка, изготовление, проведение испытаний и эксплуатация сопровождаются большими потоками разнообразной информации: организационной, технической, научной, правовой, справочной, нормативной, патентно-лицензионной, конструкторской, технической, аналитической, административно-хозяйственной, финансовой, плановой и др. Указанные потоки информации требуют соответствующих методов и способов сбора, накопления, хранения, поиска, обработки и выдачи.

В связи с этим особое внимание уделено инженеру-исследователю. Он должен хорошо знать объект исследования на уровне схмотехнических и системных представлений, владеть методами системных исследований, уметь эффективно применять средства научных исследований, иметь практические навыки в планировании и организации исследований и испытаний сложных систем, обладать широким кругозором и развитым научным мышлением. Знания инженера должны быть системными и ориентированными на решение перспективных практических и научных проблем.

В книге дана общая характеристика вооружения и военной техники как объектов испытаний и исследований, описан жизненный цикл образцов вооружения и военной техники, определены научно-технические задачи и проблемы, решаемые в стадиях жизненного цикла образцов вооружения и военной техники, сделано системное представление объектов исследований.

Качество и эффективность операции, выполняемой военно-технической системой представлены в виде моделей.

В настоящее время непрерывно растет число вновь создаваемых сложных автоматизированных систем управления боевыми действиями войск. Это объясняется насущными потребностями, возникшими вследствие значительных трудностей осуществления процесса управления войсками и оружием и увеличением масштабов предприятий военно-промышленного комплекса и достижениями в области автоматизации и вычислительной техники.

Увеличение сложности задач управления боевыми действиями в современных условиях можно проследить на росте номенклатуры выпускаемых за последние годы изделий вооружения и военной техники, увеличении в среднем их конструк-

тивной сложности и резком повышении технологического уровня производства. Такое положение значительно усложняет решение задач прогнозирования, планирования и оперативного управления процессами боевого управления в отдельных видах и родах войск и, особенно, в вооруженных силах в целом.

Появление быстродействующих ЭВМ, бурное развитие телекоммуникационных технологий и значительные успехи в вопросах автоматизации планирования войсковых операций, динамического управления боем позволяют решение указанных задач перевести на более высокий уровень на основе использования последних достижений в области теории в области исследования операций и применения математических методов в интересах решения задач военного управления.

Характерные особенности сложных систем – наличие большого числа различных элементов, объединенных в систему для достижения единой цели, а также сложные взаимно переплетающиеся связи, развитая система математического обеспечения, предназначенная для обработки огромных информационных потоков в реальном времени. Достижение системой единой цели в соответствии с ее назначением обеспечивается решением совокупности конкретных задач отдельными элементами системы или ее подсистемами. Все это учитывается при проектировании и разработке вооружения и военной техники.

Основная цель проектно-исследовательских работ состоит в том, чтобы в заданный срок получить проект системы, обладающей максимальной ожидаемой эффективностью применения по назначению в условиях ограничения ресурсов на ее создание и эксплуатацию.

Методы и организация испытаний образцов вооружения и военной техники очень важны, так как любая впервые созданная сложная система должна пройти испытания для того, чтобы можно было дать ответ: насколько эффективно решает система задачу, ради которой ее создали. Получение ответа и представляет конечную цель испытаний. Однако столь общая формулировка цели испытаний требует определенной конкретизации, особенно для сложных систем, для которых этот ответ будет складываться из результатов проверки на функционирование, оценки эффективности и некоторых дополнительных оценок.

Проверка на функционирование всегда предшествует точной количественной оценке выходных характеристик для любого сконструированного прибора или собранной схемы. Функционирование системы считают нормальным, если стыковка элементов осуществлена правильно и значения входных и выходных параметров взаимодействующих элементов согласованы, а обмен информацией между ними происходит без каких-либо видимых или скрытых механических, электрических и других видов нарушений, приводящих к выходу из строя контактов, реле или иных элементов в цепи взаимодействия или в самой аппаратуре. Таким образом, качественная оценка системы, состоящая в проверке правильности функционирования последней, является первоочередной задачей при проведении испытательных работ.

Для получения точных данных о испытываемых системах вся информация, циркулирующая внутри системы, и информация взаимодействия с другими системами регистрируется для ее дальнейшего анализа и окончательного определения характеристик и эффективности сложных радиоэлектронных систем вооружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Авен О.И., Гурин Н.И., Коган Я.А.* Оценка качества и оптимизации вычислительных систем. М.: Наука. 1982.
2. *Арефьев Е.Ю. и др.* Автоматизированная система моделирования и обработки изображений. «Аист-мини». УСиМ. 1989.
3. *Арзамасцев Д.А., Липес А.В., Мызин А.Л.* Модели оптимизации развития энергосистем. М.: Высшая школа. 1987.
4. *Артемьев В.М.* Теория систем со случайными изменениями структуры. Минск: Высшая школа. 1979.
5. *Ахмед М.Д., Рао К.Р.* Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов. М.: Связь. 1980.
6. *Ахьюджа Х.* Сетевые методы управления в проектировании и производстве. М.: Мир. 1979.
7. *Байцер Б.* Микроанализ производительности вычислительных систем / пер. с англ. под ред. В.В. Мартынюка. М.: Радио и связь. 1983.
8. *Блэк Ю.* Сети ЭВМ: протоколы, стандарты, интерфейсы / пер. с англ. М.: Мир. 1990.
9. *Бобрышев Д.К., Ресник В.Э.* Управление конфигурацией технических систем. М.: Сов. радио. 1978.
10. *Боганик Г.Н.* Об установлении порядка уравнения параболической регрессии // Теория вероятностей и ее применения. 1967. Т. 12. Вып. 4.
11. *Богуславский Л.Б.* Управление потоками данных в сетях ЭВМ. М.: Энергоатомиздат. 1984.
12. *Бройдо В.Л.* Вычислительные системы, сети и телекоммуникации. СПб: Питер. 2001.
13. *Бурков В.И., Ловецкий С.Е.* Методы решения экспериментальных комбинаторных задач (обзор) // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1968. № 4. С. 82–93.
14. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем. М.: Наука. 1978.
15. *Бутко Г.И. и др.* Оценка характеристик систем управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение. 1983.
16. *Буч Г.* Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++. Изд. 2-е. М.: Бином, СПб: Невский диалект. 1999.
17. *Вендров А.М.* Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем. М.: Финансы и статистика. 2000.
18. *Вентцель А.Д.* Курс теории случайных процессов. М.: Наука. 1975.
19. *Червоный А. и др.* Вероятностные методы оценки эффективности вооружения. М.: Воениздат. 1979.
20. *Вишневский В.М., Левнер Е.В., Федотов Е.В.* Математические модели исследования алгоритмов маршрутизации в сетях передачи данных // Информационные процессы. 2001. Т. 1. № 2.
21. *Вишневский В.М.* Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Техносфера. 2003.
22. *Востриков А.В.* Теория познания диалектического материализма. М.: Мысль. 1965.
23. *Гаврилов В.А.* Видимость в атмосфере. Ленинград: Гидрометеиздат. 1966.

24. *Галактионов А.И.* Основы инженерно-технологического проектирования АСУ ТП. М.: Энергия. 1978.
25. *Городецкий А.Я.* Восстановление марковского сообщения из дискретной случайной последовательности // *Техническая кибернетика*. 1977. № 5.
26. *Городецкий А.Я., Заборовский В.С.* Информатика. Фрактальные процессы в компьютерных сетях. СПб: Изд-во СПбГТУ. 2000.
27. *Губинский А.И.* Надежность и качество функционирования эрратических систем. Л.: Наука. 1982. .
28. *Губинский А.И. и др.* Анализ надежности сложных систем методом обобщенных чисел // В кн.: *Теория и практика надежности вычислительных и радиотехнических устройств*. Вильнюс. 1975. С. 35–51.
29. *Губинский А.И. и др.* Методические рекомендации по аналитическим методам оценки эффективности качества и надежности эргатических систем. Л.: Наука. 1978. 180с.
30. *Гушев А.В.* Итоги войны в зоне Персидского залива // *Зарубежное военное обозрение*. 1991. № 6. С. 3–12.
31. *Гушев А.В.* Военно-технические аспекты войны в зоне Персидского залива // *Зарубежное военное обозрение*. 1991. № 7. С. 3–10.
32. *Демидов Б.А.* Теория и методы военно-научных исследований вооружения и военной техники. Харьков. 1990.
33. *Диалоговые средства взаимодействия человека и ЭВМ* / под ред. *Ю.В. Гайковича*. М.: Воениздат. 1984.
34. *Дмитриев В.А.* Управляемые авиационные бомбы // *Зарубежное военное обозрение*. 1985. № 7. С. 40–45.
35. *Дружинин В.В., Конторов Д.С.* Системотехника. М.: Наука. 1986.
36. *Дубошин Г.Н.* Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Физматгиз. 1963.
37. *Дуров Б.В.* В поисках новой техники // *Авиация и космонавтика*. 1991. № 10. С. 26–27.
38. *Дуров Б.В.* В поисках новой техники // *Авиация и космонавтика*. 1991. № 12. С. 17–20.
39. *Дюбуа А.* Теория возможностей. Приложения к представлению знаний (пер. с фр.) М.: Радио и связь. 1992.
40. *Евтушенко Е.Г.* Методы решения экстремальных задач и их применение в системах автоматизации. М.: Наука. 1982.
41. *Елманова Н.* В ожидании Windows Server 2003 // *Компьютер-пресс*. 2003. № 4.
42. *Елманова Н.* Серверные операционные системы ведущих производителей // *Компьютер Пресс*. 2003. № 10.
43. *Ефимов Е.Л.* Управляемые авиационные бомбы зарубежных стран // *Зарубежное военное обозрение*. 1984. № 12. С. 55–63.
44. *Жданюк Б.Ф.* Основы статистической обработки траекторных измерений. М.: Сов. радио. 1978.
45. *Железнов И.Г., Семенов Г.П.* Комбинированная оценка характеристик сложных систем. М.: Машиностроение. 1976.
46. *Железнов И.Г.* Сложные технические системы (оценка характеристик). М.: Высшая школа. 1984. 119 с.
47. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир. 1976.
48. *Зажигаев Л.С., Кишьян А. А., Романиков Ю.И.* Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. М.: Атомиздат. 1978.
49. *Казаков И.Е., Артемьев В.М.* Оптимизация динамических систем случайной структуры. М.: Наука. 1980.

50. *Калянов Г.Н.* CASE-технологии: Консалтинг в автоматизации бизнес процессов. М.: Горячая линия – Телеком. 2000.
51. *Карасев А.И.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Статистика. 1979.
52. *Каргаполов М.И., Мерзляков Ю.И.* Основы теории групп. М.: Наука. 1982.
53. *Каренин Н.В.* Авиационное оружие для нанесения ударов по аэродромам // Зарубежное военное обозрение. 1984. № 12. С. 55–63.
54. *Климович Е.* Средства и способы преодоления ПВО // Вестник ПВО. 1991. № 11. С. 61–65.
55. *Клыков Ю.И.* Ситуационное управление большими системам. М.: Энергия. 1974.
56. *Клыков Ю.М.* Язык ситуационного управления // В кн.: Семиотические методы управления в больших системах. М.: 1971. С. 67–81.
57. *Кобчиков А.В. и др.* Вопросы автоматизации проектирования информационно-управляющих радиоэлектронных систем // В кн.: Прием и обработка информации в сложных информационных системах. Казань. 1988. Вып. 17. С. 22–30.
58. *Конвей Р.В. и др.* Теория расписаний. М.: Наука. 1975.
59. *Корбут А. А., Финкельштейн Ю.Ю.* Дискретное программирование. М.: Наука. 1969.
60. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. М.: Наука. 1973.
61. *Кориунов Ю.М.* Математические основы кибернетики. М.: Энергоатомиздат. 1987.
62. *Кульчин М.* Технологии корпоративных сетей. СПб: Изд-во «Питер». 2000.
63. *Лазарев В.Г., Паршенков И.А.* Управление потоками данных в сети коммутации пакетов с виртуальными каналами // Системы управления информационных сетей. М.: Наука. 1983.
64. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 1. М.: Сов. радио. 1974.
65. *Липаев В.В.* Проектирование программных средств. М.: Высшая школа. 1990.
66. *Мартин М.Дж.* Введение в сетевые технологии. Практическое руководство по организации сетей. Издательство «ЛОРИ». 2002.
67. *Малашев Н.Г.* Структурно-автоматные модели технических систем. М.: Радио и связь. 1986.
68. *Мамиконов А.Г., Кульба В.В.* Синтез оптимальных модульных систем обработки данных. М.: Наука. 1986.
69. *Мамиконов А.Г., Цвиркун А.А., Кульба В.В.* Автоматизация проектирования АСУ. М.: Энергоатомиздат. 1982.
70. *Мартин Д., Чапмен К., Либен Д.* АТМ. Архитектура и реализация. М.: ЛОРИ. 2000.
71. *Мельцер М.И.* Диалоговое управление производством. М.: Финансы и статистика. 1983.
72. *Минский М.* Фреймы для представления знаний. М.: Энергия. 1979.
73. *Мирук В.Ф.* Противоракетная оборона от нестратегических баллистических ракет // Военная мысль. 1996. № 3. С. 15–19.
74. *Михайлов С.А.* Математическая модель затрат на испытания сложной технической системы // Управление эффективностью и качеством. 1989.
75. *Михалевич В.С., Волкович В.Л.* Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М.: Наука. 1982.
76. *Модели и системы управления комплексными экспериментальными исследованиями / под ред. Е.И. Пономарева.* М.: Наука. 1986.
77. *Нагибин П.* Технологии локальных сетей от Рюрика до гигабайта // Компьютер-пресс. 2002. № 10.
78. *Назаров С.В.* Локальные вычислительные сети. Организация, функционирование, эффективность, оптимизация. М.: Финансы и статистика. 1994.
79. *Налимов В.В.* Теория эксперимента. М.: Наука. 1971.
80. *Неупокоев Ф.В.* Стрельба зенитными ракетами. М.: Воениздат. 1980.
81. *Никулин О.Ю., Петрушин А.Н.* Системы телевизионного наблюдения. М.: ОБЕРЕГ. 1997.

82. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб: Питер. 2001.
83. *Оре О.* Теория графов. М.: Наука. Гл. ред. физ. мат. лит. 1980.
84. Основы оптимизации текущего отраслевого планирования / под ред. *Б.П. Суворова*. М.: Наука. 1987.
85. *Плетнев И.Л. и др.* Эффективность и надежность сложных систем. М.: Машиностроение. 1977.
86. *Подиновский В.В., Ногин В.Д.* Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука. 1982.
87. *Поляков И.К., Львов Г.И.* Математические модели в диалоговом режиме // Вестник ПВО. 1983. № 3. С. 33–35.
88. *Поспелов Г.С., Ириков В.А.* Программно-целевое планирование и управление. М.: Сов. радио. 1976.
89. *Поспелов Г.С., Поспелов Д.А.* Искусственный интеллект – прикладные системы. М.: Знание. 1985.
90. *Поспелов Д.А.* Логико-лингвистические модели управления в системах управления. М.: Энергоатомиздат. 1981.
91. *Поспелов Д.А.* Ситуационное управление: теория и практик. М.: Наука. 1986.
92. *Мамиконов А.Г., Кульба В.В., Миронов А.С. и др.* Предпроектный анализ структуры и информационных потоков и технологии обработки данных при разработке модульных СОД. М.: ИПУ. 1980.
93. Представление знаний в человеко-машинных и робототехнических системах. Т. А. Фундаментальные исследования в области представления знаний. М.: ВЦ АН СССР, ВИНТИ. 1984.
94. *Прохоров А.* Серверные ОС: статистика и прогнозы // Компьютер Пресс. 2002. № 10.
95. *Пугачев В.Н.* Комбинированные методы определения вероятностных характеристик. М.: Сов. радио. 1973.
96. *Прэт У.* Цифровая обработка изображений. Кн. 2. М.: Мир. 1982.
97. *Равич Г.С.* Обоснование затрат на испытания опытных образцов вооружения на основе применения критерия «эффективность – стоимость» // Стандартизация военной техники. 1982. № 3. 8 с.
98. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9-ти кн. Кн.6. Техническая имитация интеллекта / под ред. *И.М. Макарова*. М.: Высшая школа. 1986. 144 с.
99. *Vononi F., Frendick K.* The Rate-Based Flow Control Framework for the Available Bit Rate ATM Service // IEEE Network. March/April 1995.
100. *Рыбаков Ф.И.* Системы эффективного взаимодействия человека и ЭВМ. М.: Радио и связь. 1985.
101. *Рябинин И.А., Черкесов Г.Н.* Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь. 1981.
102. *Саенко С.В.* Зенитные ракеты против баллистических // Вестник ПВО. 1991. № 10. С. 62–65.
103. *Саркисян С.А., Ахундов В.М., Минаев Э.С.* Анализ и прогноз развития больших технических систем. М.: Наука. 1982.
104. *Свиткин М.* Процессный подход при внедрении систем менеджмента качества в организации // Стандарты и качество. 2002. № 3.
105. *Семенов А.Б.* Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи. М.: Компьютер-пресс. 1998.
106. *Сильвестров Д.С.* Полумарковские процессы с дискретным множеством состояний (основы расчета функциональных и надежностных характеристик стохастических систем). М.: Наука. 1980.

ЛИТЕРАТУРА

107. *Скребушевский Б.С.* Анализ возможностей использования космических средств для обнаружения стартов ОТР // Военная мысль. 1994. № 4. С. 30–33.
108. *Соломатин Н.М.* Информационные семантические системы. М.: Высшая школа. 1989.
109. Состояние и развитие гибких производственных систем // Труды IV Международной конференции по гибким производственным системам. Ленинград. 1987.
110. Справочник офицера противовоздушной обороны. М.: Воениздат. 1987.
111. *Стерн Монти.* Сети предприятий на основе Windows NT для профессионалов (пер. с англ.) СПб: Питер. 1999.
112. *Столингс В.* Современные компьютерные сети. Изд-е 2-е. СПб: Питер. 2003.
113. *Сурнин В.* Деятельность мозга и мышление // Стандарты и качество. 2003. № 1.
114. *Сурнин В.* От объектов материального мира к информационно-обменным процессам человека // Стандарты и качество. 2003. № 5.
115. *Сычевский М.* Использование BPwin в консалтинговых проектах // Компьютер Пресс. 2002. № 1.
116. *Танаев С.Г.* Введение в теорию расписаний. М.: Наука. 1975.
117. *Таненбаум Э.* Компьютерные сети (пер. с англ.). СПб: Питер. 2004.
118. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике. М.: Радио и связь. 1990.
119. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио. 1966.
120. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио. 1976.
121. *Трапезников В.А.* Управление и научно-технический прогресс. М.: Наука. 1983.
122. *Федер Е.* Фракталы / пер.с англ. М.: Мир. 1991.
123. *Федоров В.В.* Теория оптимального эксперимента. М.: Наука. 1971.
124. Фракталы в физике / пер. с англ. под ред. *Л. Пьетронеро, Э. Тозатти.* М.: Мир. 1988.
125. *Фридман А.Л.* Основы объектно-ориентированной разработки программных систем. М.: Финансы и статистика. 2000.
126. *Фролов А.В., Фролов Г.В.* Локальные сети персональных компьютеров. М.: Диалог-МИФИ. 1994.
127. *Цвиркун А.Д.* Основы синтеза структуры сложных систем. М.: Наука. 1982.
128. *Челлис Д., Перкинс Ч., Стриб М.* Основы построения сетей. Учебное руководство для специалистов MCSE (пер. с англ.). М.: ЛОРИ. 1997.
129. *Черноуцкий И.Г.* Оптимальный параметрический синтез: Электротехнические устройства и системы. Л.: Энергоатомиздат. 1987.
130. *Шатино Д.И.* Принятие решений в системах организационного управления: Использование расплывчатых категорий. М.: Энергоатомиздат. 1983.
131. *Шаракианэ А.С., Железнов И.Г.* Испытания сложных систем. М.: Высшая школа. 1974.
132. *Шаракианэ А.С. и др.* Сложные системы. М.: Высшая школа. 1997.
133. *Шоломов Л.А.* Логические методы исследования дискретных моделей выбора. М.: Наука. 1989.
134. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / под ред. *Р.М. Юсупова.* Л.: Энергия. 1978.
135. *Виноградов В.А. и др.* Эффективность сложных систем. Динамические модели. М.: Наука. 1989.
136. *Ярославский Л.П.* Введение в цифровую оптику. М.: Радио и связь. 1987.
137. ATM Forum. ATM User-Network Interface (UNI) Signaling Specification Version 4.0. af-sign-0061.000. July 1996.
138. ATM Forum. Traffic Management Specification. Draft Version 4.1. BTD-TM-02.02. December 1998.
139. *Bergman W.* Narrowband Frame Relay Congestion Controll // Proceedings of the Tenth Annual Phoenix Conference of Computers and Communications. March 1991.

140. *Gafni M., Bertsekas D.* Asymptotic Optimality of Shortest Path Routing Algorithms // IEEE Trans of Information Theory. 1987. No. 1.
141. *Gersht A., Lee K.* A Congestion Control Framework for ATM Networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. September 1991.
142. *Comer D.E.* Internetworking with TCP/IP: Principles, Protocols and Architecture. Prentice Hall. 1995.
143. *Mandelbrot B.B.* The fractal Geometry of Nature. New York. Freeman. 1983.
144. *Craig H.* TCP/IP Network Administration. O'Reilly & Associates. 1998.
145. *Соколов С.П., Лаговиев А.И.* Оценка показателей внешней и внутренней эффективности образцов ВВТ, поступающих на испытания // Научно-технический сборник. В/ч. 29139. 2006.
146. *Соколов С.П., Лаговиев А.И.* Реализация оптимизационно-имитационного подхода при выборе алгоритмов функционирования в сети передачи данных полигона. М.: 46 ЦНИИ МО. 2006.
147. *Соколов С.П., Лаговиев А.И.* Агрегирование информационной модели системы полигонных испытаний // Вопросы оборонной техники. М., 2006.

I.R. Ashurbeyli, A.I. Lagovier, S.P. Sokolov

COMPLICATED RADIO-ELECTRONIC SYSTEMS OF ARMAMENT

Planning and management of creation

SUMMARY

In the book the general characteristic of armaments and military equipment as objects of system researches is given and the contents of military-scientific and scientific-technical problems and challenges solved at the stages of life cycle of products are described. The main foundations of qualimetry, the theory of efficiency and operation analysis are shown. Various aspects of the system researches which are carried out at planning of development and working out of armaments and military equipment are described. Bases of the decision-making theory, optimization problems with comparison of alternatives on scalar and vector quality performance, methods of expert estimation of objects of a choice are considered. The considerable attention is given to methods of experimental researches. The system of tests of products is described and the content of research tests is opened as well as statistical characteristics of a method of processing and the analysis of experimental data, including methods of dispersive, regressional and factorial analyses, and also the methods of planning of research tests are shown.

CONTENTS

INTRODUCTION

ARMAMENTS AND MILITARY EQUIPMENT AS OBJECTS OF RESEARCH

General characteristic of armaments and military equipment as objects of research
Life cycle of samples of armaments and military equipment. The military-scientific and scientific-technical problems solved at stages of life cycle of a sample of armaments and military equipment
System representation of objects of researches
Representation of products of military equipment as objects of researches by means of their properties and quality indicators
Quality and efficiency of the operation carried out by a military-technical system

METHODS OF SYSTEM RESEARCHES APPLIED AT PLANNING DEVELOPMENTS AND WORKING OUT OF ARMAMENTS AND MILITARY EQUIPMENT

Methodological bases of scientific researches. Methodology.
System of methods of scientific researches
Military science, its problems and contents
Methods and means of scientific researches
Basic directions and general principles of carrying out researches of armaments and military equipment
Tactical, technical and economical feasibility study of armaments and military equipment

COMPLICATED SYSTEMS

Complicated systems and their peculiarity
Criteria of efficiency of complicated systems
Skilled-theoretical method of an estimation of indicators of efficiency of complicated systems
System approach to research of operations, the analysis and synthesis of complicated systems
Methods of the analysis of complicated systems

DESIGNING AND WORKING OUT OF ARMAMENTS AND MILITARY EQUIPMENT

Design-research works and main principles of designing of systems
Characteristics of the methods of system designing and typical design procedures
Methodical bases of the researches carried out at planning
of a designing and synthesis of system
Formalization of a problem of system designing
Decomposition of a problem of system designing
Theory of decision-making at designing of complicated systems of armaments
Classification and general characteristic of problems of decision-making
Generalized model of decision-making process at comparison
of alternatives on several indicators of quality

METHODS AND ORGANIZATION OF TESTS OF SAMPLES OF ARMAMENTS AND MILITARY EQUIPMENT

Purposes and problems of tests
System of tests of products. The basic characteristics of the testing process
Stages of tests. Organizational-methodical bases and technology of tests
Analysis of requirements to the organization of test works
Choice of test methods of samples of armaments and military equipment. Methods of
experimental researches of armaments and military equipment
Choice of test specifications
Basic concepts of the theory of planning of experiment
Application of network methods of tests planning

REALISTIC TESTS OF PRE-PRODUCTION MODELS OF ARMAMENTS AND MILITARY EQUIPMENT

Problems solved by preparation and carrying out of realistic tests
of pre-production models of armaments and military equipment
Optimization of the plan of tests
Problem of a choice of the number of experiments by the method of dynamic
programming
Problem of optimum distribution of means of experimentally-research base
Tests of program algorithms

METHODS OF RECEPTION OF TRAJECTORY INFORMATION AT TESTS OF ARMAMENTS AND MILITARY EQUIPMENT

Frames used at trajectory measurements
Interrelation between different frames

Methods of definition of coordinates of a trajectory
Methods of measurement of speed
Short comparative characteristic of speed measurement methods
Methods of measurement of movement parameters
Statistical methods of processing of trajectory measuring information
Methods of solution of systems of linear equations
Errors of smoothing by the least squares method

SYSTEM OF SEMIREALISTIC SIMULATION

Role and place of the system of semirealistic simulation
in the general system of tests
History of formation of system of semirealistic simulation
Structure of complex imitating simulation installation
Principles of semirealistic simulation
Methodology of application of the complex imitating simulation installation
Prospect of the development of a semirealistic simulation system

Научное издание

СЛОЖНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ВООРУЖЕНИЯ

ПЛАНИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ СОЗДАНИЕМ

Авторы:
Игорь Рауфович Ашурбейли
Александр Ильич Лаговниер
Сергей Петрович Соколов

Редактор **Н.П. Комарова**

Изд. № 19. Сдано в набор 13.06.2010.
Подписано в печать 25.08.2010. Формат 70×100 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать офсетная
Печ. л. 27,5. Тираж 500 экз. Зак. №

Издательство «Радиотехника».
107031, Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6.
Тел./факс: (495) 621-48-37; 625-78-72, 625-92-41.
E-mail: info@radiotec.ru
www.radiotec.ru

Отпечатано в ордена Трудового Красного Знамени
типографии им. Скворцова-Степанова ФГУП Издательство «Известия»
Управления делами Президента Российской Федерации.
Генеральный директор Э.А. Галумов
127994, ГСП-4, г. Москва, К-6, Пушкинская пл., д. 5.
Контактные телефоны: (495) 694-30-20, 694-36-36
e-mail: izd.izv@ru.net