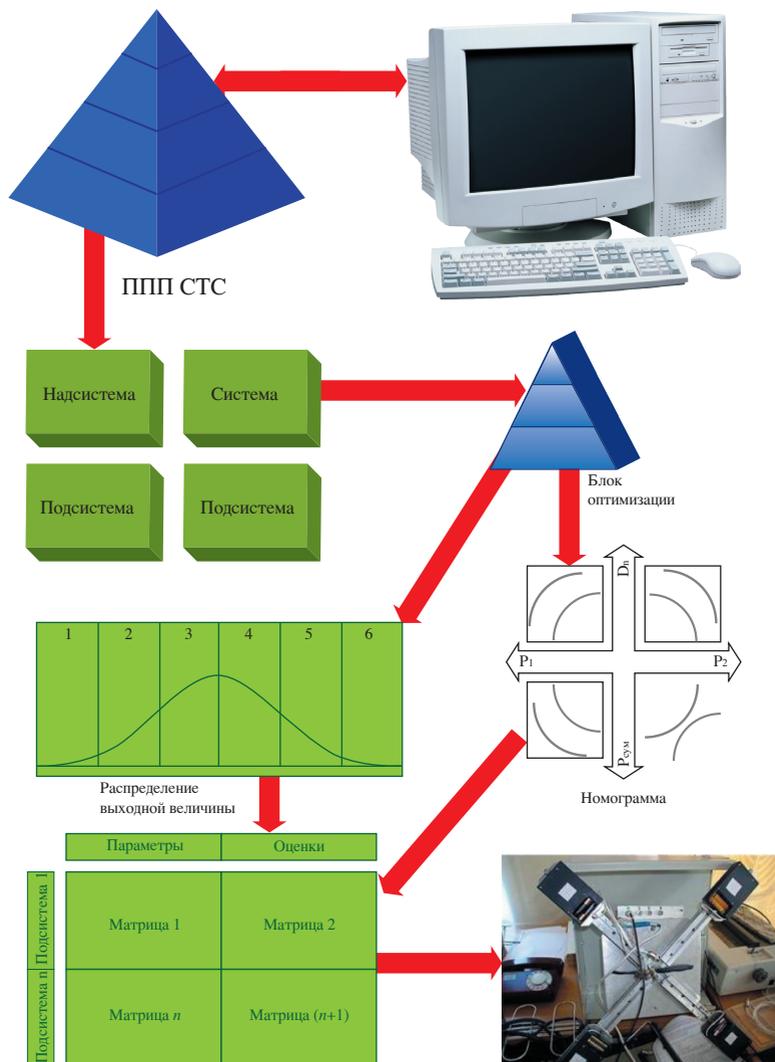


# ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ



*Г.В. Абраменко, К.В. Власов, М.А. Краснощеков*

**ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ  
ПО ПРИМЕНЕНИЮ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА  
К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

МОСКВА

2015

УДК 681.516.4:629.734/.735  
ББК 32.817  
А16

Рецензент  
Лауреат Премии Ленинского комсомола,  
кандидат технических наук  
**А.Ю. Краснощеков**

**А16 Г.В. Абраменко, К.В. Власов, М.А. Краснощеков. Практические рекомендации по применению системного анализа к проектированию сложных технических систем – М: ООО «Оргсервис-2000», 2015. – 300 с., с ил.  
ISBN 978-5-98115-180-4**

**32.847+32.965.9**

Монография является продолжением работ по применению системного анализа в проектировании сложных технических систем. Авторы обобщили материалы по основным принципам системного анализа и сформировали методики проектирования, как сложной технической системы, так и ее подсистем.

В качестве примеров обобщены результаты исследований и проектирования самонаводящейся парашютной системы (СПС) по доставке грузов в труднодоступные районы и для мониторинга опасных для человека районов земной поверхности и в качестве подсистемы выбран акустический канал. Идеология СПС и акустического канала впервые была предложена авторами монографии.

Монография предназначена для конструкторов, инженеров-технологов – создателей сложных наукоемких комплексов и систем, специалистов по системному анализу, студентов и аспирантов вузов технических специальностей и ориентирована на получение и последующее применение знаний, направленных на развитие различных областей науки и техники.

ISBN 978-5-98115-180-4

© Абраменко Г.В., Власов К.В.,  
Краснощеков М. А., 2015

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Начиная с 1985 г. авторы работали над развитием методов и методик системного анализа применительно к проектированию сложных технических систем. В качестве базовых СТС были выбраны самонаводящаяся парашютная система и акустический канал. Результаты исследований были опубликованы в книгах [1-9], статьях [10-20], патентах [21 - 23] и программах, зарегистрированных в Роспатенте [24, 25].

Однако обсуждение перечисленных материалов со специалистами выявил некоторую недостаточность примеров, помогающих понять приведенный материал. В связи с этим в предлагаемой книге авторы постарались устранить отмеченный недостаток и уделили большее внимание примерам и практическим рекомендациям по применению системного анализа при проектировании СТС.

Несмотря на то, что в настоящее время появилось множество книг по системному анализу, необходимость данной книги обосновывается примерами и рекомендациями для общего вида СТС, дано обобщенное описание СПС и акустического канала. Особое внимание обращено на проектирование систем противодействия.

Актуальность книги состоит в необходимости создания новых, эффективных методов проектирования СТС.

Новизна задач, приведенных в книге, состоит в развитии метода обратных задач и метода ранжирования альтернативных вариантов сложных систем при исследовании и проектировании СТС.

Книга предназначена для конструкторов, инженеров-технологов – создателей сложных наукоемких комплексов и систем, специалистов по системному анализу, студентов и аспирантов вузов технических специальностей.

Почетный машиностроитель,  
канд.техн.наук, ст.научн.сотр.  
Абраменко Г.В.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Системный анализ, системный подход широко используется при исследовании, разработке и проектировании различных систем и комплексов, но при этом понятия и определения, применяемые различными исследователями, существенно отличаются. В течение многих лет авторы отработывали методики системного анализа на примерах создания высокоточных систем. Применение высокоточных систем в нашей стране и за рубежом (например, в военной области, гражданской авиации) показывает, что например доставка грузов как в перечисленных ситуациях, так и при доставке грузов в труднодоступные районы (например, полярникам в районы зимовок, геологам в тайге) может осуществляться автономно с обеспечением всеуточности и всепогодности. Создание подобных систем сложная и достаточно многофункциональная задача, требующая применения нестандартных приемов исследования и проектирования.

Авторы продолжают и развивают основы системного анализа, заложенные в трудах отечественных ученых Н.Н. Моисеева [26], В.Г. Болтянского, В.Н. Садовского, Д.М. Хомякова, Д.М. Жилина, А.В. Ильичева, В.А. Грушанского [ 27-35].

Усложняющийся технический облик современных комплексов предполагает наличие множества связей между системой и ее подсистемами, внешней средой, различными искусственными и естественными помехами (противодействием), требованиями заказчика и возможностями производства и существующих технологий. В этой связи создание сложных технических систем (СТС) требует применения перспективных методов и приемов проектирования, позволяющих учесть множество связей, и при применении системного анализа, позволяющего объединить перечисленные аспекты в едином алгоритме.

Сочетание системного подхода с современными вычислительными комплексами и средствами представления данных позволяет повысить эффективность в процессе проектирования за счет создания баз знаний результатов научно-технической деятельности.

Актуальность применения системного анализа вызвана следующими причинами:

- возрастанием сложности задач, стоящих перед современными системами;
- все более удорожающейся технологией создания систем и комплексов;

- расширением областей применения подобных систем;
- значительным увеличением количества альтернативных вариантов технического решения системы.

Анализ литературы по системному анализу показал, что, с одной стороны, имеется много литературы по данному вопросу, с другой стороны, методических книг – ограниченное количество. Особенностью настоящего пособия является то, что из множества подходов к формированию математического описания, критериев, ограничений здесь принята методология оценки альтернативных вариантов на основе применения *спектрального метода* [36], разработанного для решения различных задач техники и экономики [7]. Этот метод увязывается с идеологией системного анализа, предложенного академиком Н.Н.Моисеевым. Развитие данного подхода позволяет решить ряд задач по формированию множества параметров, позволяющего лицу, принимающему решение, обосновать свой выбор (образца, услуг, путей развития организации и т.п.).

С точки зрения авторов издания, книга Н.Н.Моисеева [26] является наиболее полной в постановке задач системного анализа и выделению наиболее специфических особенностей системного подхода к проектированию сложных систем.

В пособии [5] рассматривается количественный метод выбора характеристик технического облика системы и ее подсистем. Такой выбор возможен при наличии:

- метода анализа сложной системы для выявления функциональных и структурных связей подсистем с целью дальнейшей оптимизации параметров, обуславливающих данные связи;
- методики оценки параметров технического облика системы и их выбора, позволяющей сравнивать различные варианты системы по обобщенным показателям;
- математических моделей оптимизации интегральных характеристик подсистем;
- математической модели сведения Парето - неоптимизируемых систем к одному показателю (комплексному показателю технического облика системы), определяемому множеством характеристик системы.

**Системный подход** – это наиболее общий подход к анализу систем: технических, экономических, экологических и др. Вопросам оптимизации сложных систем посвящено достаточно много работ, и выбор того или иного метода определяется личными пристрастиями исследователя, его возможностями в использовании вычислительной техники.

Отметим, что в данной монографии идеология оценки альтернативных вариантов на основе применения спектрального метода используется для Парето - неоптимизируемых систем.

Принцип Парето позволяет сократить множество исходных вариантов, т.е. исключить из неформального анализа те варианты решений, которые заведомо будут плохи. Принцип Парето не выделяет единственное решение, а сужает множество альтернатив.

В качестве базового примера рассматривается разработка самонаводящейся парашютной системы (СПС). Разработка высокоточных самонаводящихся систем доставки грузов представляет собой нетрадиционную задачу и требует специального методического аппарата, основанного на использовании системного подхода к проектированию сложных технических объектов [1-9].

В отличие от большинства традиционных постановок, предусматривающих разработку отдельных подсистем комплекса (сложной технической системы (СТС)) эвристическими методами с последующим расчетом эффективности СТС, в данной монографии предлагается разработку технического облика проводить от заданного значения эффективности выполнения задачи к вычислению технических характеристик отдельных подсистем рассматриваемого комплекса.

Новизна описываемого подхода заключается в том, что предлагается количественный метод выбора характеристик технического облика СТС и интегральных характеристик отдельных ее подсистем, заключающихся в определении оптимальных, с точки зрения технического уровня, параметров подсистем СТС таким образом, чтобы выполнялся наперед заданный общий критерий эффективности.

Применение системного подхода позволяет решить задачу оптимизации параметров подсистем комплекса с точки зрения выполнения заданной целевой задачи с учетом свойства целостности комплекса как многоуровневой сложной системы. Под целостностью понимается то, что свойства системы не всегда следуют из свойств ее отдельных подсистем, так как изменение параметров одной из подсистем может привести к изменению соотношений между остальными подсистемами.

В качестве базовой подсистемы СТС выбран акустический канал, разработанный авторами и коллективом сотрудников, работавших над этим проектом [37-39]. Авторы считают, что акустический канал имеет большие перспективы при применении в различных СТС, особенно для воздушных систем. Акустический канал дешев, практичен, однако имеет невысокую точность по сравнению с ИК ГСН и аналогичными изделиями. Несмотря на это, применение акустического канала повышает помехоустойчивость СТС,

позволяет повысить точность наведения при использовании группы маяков, позволяет исключить ложные маяки.

Глава 1 посвящена принципам построения системного анализа. Авторы сознательно и принципиально повторяют с небольшими изменениями во всех книгах [1-9] материал данной главы для того, чтобы утвердить в сознании читателя системные принципы проектирования СТС. Системный анализ – это мощный аппарат исследования сложных систем независимо от структуры, области применения, технологий производства.

В главе 2 рассматривается вспомогательный материал, включающий метод ранжирования альтернативных вариантов и примеры методов оптимизации.

Глава 3 посвящена применению системного анализа к общей структуре СТС. Сделана попытка обобщить подход к проектированию СТС независимо от назначения системы.

В главе 4 рассмотрены вопросы реализации подсистем СТС на основе применения системного анализа.

Глава 5 посвящена описанию в качестве примера технического облика (ТО) СПС.

В главе 6 обобщены материалы по проектированию акустического канала.

Глава 7 посвящена примерам проектирования систем противодействия.

\*\*\*

Авторы выражают искреннюю благодарность за поддержку и помощь в издании книги сотрудникам, принимавшим участие в разработке программного продукта, проведении математического и полунатурного моделирования и в полигонных испытаниях Л.Г. Красиковой, Л.С. Королевой, М.Г. Фабричному, М.П. Шиловскому, А.А. Шорину, Т.П. Шукиной, А.Н. Кузнецову а также будут благодарны читателям, которые пришлют отзывы на предлагаемую книгу по адресу [genvikabr@mail.ru](mailto:genvikabr@mail.ru).

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АК	— акустический канал
АЦП	— аналого —цифровой преобразователь
БЛА(БПЛА)	— беспилотный летательный аппарат
БВС	— бортовая вычислительная система
БЦВС	— бортовая цифровая вычислительная система
БЦВМ	— бортовая цифровая вычислительная машина
БУП	— блок управления парашютом
ГСН	— головка самонаведения
ДН	— диаграмма направленности
ДПЛА	— дистанционно пилотируемый летательный аппарат
ЗО	— зона обзора
ЗСК	— земная система координат
ИБ	— информационный блок
ИК	— инфракрасный
ИНС	— инерциальная навигационная система
ИО	— исполнительные органы
ИС	— информационная система
КФ	— корреляционная функция
ЛА	— летательный аппарат
ЛПР	— лицо, принимающее решение
ЛЦ	— ложная цель
ММ	— миллиметровый
ОЗУ	— оперативное запоминающее устройство
ПЗУ	— постоянное запоминающее устройство
ПДО	— предельная дальность обнаружения
ПЗ	— поле зрения
ПНМ	— полунатурное моделирование
ПП	— подстилающая поверхность
ПРД	— противодействие
ПЭВМ	— персональная ЭВМ
РЛ	— радиолокационная
РК	— радиокомандная система наведения
РТК	— робототехнический комплекс
РТС	— робототехническая система
РЭБ	— радиоэлектронная борьба
РЭЗ	— радиоэлектронная защита
РЭС	— радиоэлектронные средства
САУ	— система автоматического управления
СКО	— средне квадратическое отклонение
СПС	— самонаводящаяся парашютная система
СТС	— сложная техническая система
СУ	— система управления
ТО	— технический облик
ФО	— фоновая обстановка
ФЦО	— фоноцелевая обстановка
ЦАП	— цифро-аналоговый преобразователь
ЦВМ	— цифровая вычислительная машина
ЭВМ	— электронная вычислительная машина
ЭМС	— электромагнитная совместимость

# Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

## 1.1. Основные понятия сложных систем

В настоящее время имеется множество книг и монографий по системному анализу. Авторы взяли за основу серию книг по системному анализу [1 - 9], на основе которых далее приведено краткое описание основных понятий системного анализа, понятия сложных систем и т.п.

Следует отметить, что авторы работают над методологией системного анализа с 1983 г., в 1989 г. коллектив ученых за разработку системного метода для исследования высокоточных изделий получил премию Ленинского комсомола, в 1995 г. авторы издали монографию по применению системного анализа применительно к проектированию самонаводящихся парашютных систем[1].

В данной главе приведен материал, обновленный и добавленный по результатам собственных исследований авторов, а также по материалам других исследователей в области системного анализа [26-35].

Системный подход - это наиболее общий подход к анализу любых систем: технических, экономических, экологических. Теория эффективности используется для выделения из пространства параметров системы областей равной эффективности и определения диапазонов оптимизации характеристик системы. С помощью методов системного анализа из полученных областей выделяется конечное множество оптимальных точек, и тем самым определяются характеристики системы и их подсистем. В методологии гармонично связаны аналитические методы, полунатурное и математическое моделирования, натурные испытания. При необходимости методологию можно дополнить экономическими расчетами и проведением маркетинговых исследований.

При выборе характеристик отдельных подсистем на различных этапах проектирования можно оценить взаимозависимость характеристик подсистем и их влияние на выполнение целевой задачи. Оптимизация в этом случае проводится по критерию

$$\begin{aligned} |W - W(a_{ij})| \rightarrow \min, \quad i=1, \dots, n \\ \{ a_{ij} \} \subset A, j=1, \dots, m, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $A$  - область допустимых значений  $a_{ij}$ , определенная на этапе конструирования подсистем;

$W(a_{ij})$  - эффективность функционирования системы;

$W$  - эталонная эффективность, определенная на высшем уровне иерархии сложной комплексной системы, исходя из заданной эффективности выполнения задачи;

$n$  – число подсистем;

$m$  – число параметров.

Вопросам оптимизации сложных систем посвящено достаточно много работ, и выбор того или иного метода определяется личными пристрастиями исследователя, его возможностями в использовании вычислительной техники [40—45].

Отметим, что идеология оценки альтернативных вариантов на основе применения спектрального метода используется для Парето — неоптимизируемых систем. Согласно [32, 33], линейная свертка частных критериев может быть проведена путем ранжирования целей, которое вместе с вычислением весовых коэффициентов позволяет свести задачу со многими критериями к задаче с одним критерием. Такой подход не является универсальным способом принятия решения в условиях неопределенности проектирования системы.

Принцип Парето позволяет сократить множество исходных вариантов, т.е. исключить из неформального анализа те варианты решений, которые заведомо будут плохи. Принцип Парето не выделяет единственного решения, а сужает множество альтернатив [26, 41].

Предлагаемый подход позволяет выделить наилучший вариант среди множества оптимальных вариантов именно для Парето — неоптимизируемых систем. Следует отметить, что в некоторых источниках, например [46,47], *ранжирование альтернативных вариантов является основной задачей системного подхода.*

Необходимость разработки сложных систем и актуальность задачи определения направлений дальнейшего развития систем вызвана следующими причинами:

- усложнением и расширением перечня задач, выполняемых современными системами;
- продолжающимся удорожанием технологии создания систем;
- несоответствием технических характеристик систем некоторым областям их применения;
- значительным увеличением количества технических решений для разработки систем, предлагаемых для проектирования, полученных экспертным путем и др.

В связи с этим для полноты и однозначности оценки надежности и эффективности систем, а также определения направления их развития необходимо сложную комплексную систему представлять в виде некоторого множества функциональных и структурных связей с целевым назначением, определяемым поставленными перед системой задачами. Указанный подход, в отличие от принятых способов проектирования, требует использования нетрадиционных методов и ввода дополнительной терминологии.

*Система* – это совокупность элементов (предметов любой природы), находящихся в отношениях и связях друг с другом.

Системы делятся на простые и сложные, отличающиеся предсказуемостью и слабой предсказуемостью. Простые системы имеют предсказуемое поведение, свойства и реакции на внешние воздействия.

*Сложные системы* отличаются слабо предсказуемым поведением. Характерной особенностью сложных систем является их способность принимать решения.

Сложная система обычно характеризуется многомерностью (большим числом составных элементов), многообразием форм связи (разнородностью структур), многокритериальностью (противоречивостью критериев оценки), многообразием природы элементов (наличием технических устройств и человека), многократностью изменения состояния.

Под *элементом* понимается первичный компонент (часть единого целого), который в интересах данного исследования не подлежит дальнейшему разбиению на части. Целенаправленное объединение элементов порождает новые качества и позволяет системе выступать по отношению к окружающей среде как единое целое.

Считается, что сложной называется такая система, которая обладает, по крайней мере, одним из следующих перечисленных признаков:

- допускает разбиение на подсистемы, изучение каждой из которых (с учетом влияния других подсистем в рамках поставленной задачи) носит содержательный характер;
- функционирует в условиях существенной неопределенности, и воздействие среды на нее обуславливает случайный характер изменения ее параметров и структуры;
- осуществляет целенаправленный выбор своего поведения.

Дополнительными особенностями, характеризующими сложную систему, являются:

- крупные размеры системы (значительное количество элементов, большая размерность соотношений, описывающих систему, множество ее состояний и т.д.);
- сложная иерархическая структура системы, в которой сочетаются принципы централизованного и децентрализованного управления;
- циркуляция больших информационных, энергетических и вещественных потоков, интенсивный обмен этих потоков с внешней средой;
- увеличение неопределенности в описании системы и особенно ее взаимодействия со средой, в частности, анализ конфликтных ситуаций;
- многоцелевой аспект функционирования системы.

С учетом этих особенностей предложим следующую формулировку: *под системой понимается полная совокупность объектов, свойств и отношений, необходимых для достижения конкретной цели.*

Исследование современных сложных систем основано на системном подходе - методологии исследования объединений элементов в природе и обществе. При таком подходе предполагается, что взаимосвязь и взаимодействие элементов обеспечивают новые системные свойства исследуемого объекта. Эти свойства не свойственны его отдельным элементам или их совокупности без системного их объединения.

*Связь* – это понятие, которое входит в любое определение системы и обеспечивает возникновение и сохранение целостности ее свойств. Оно одновременно характеризует и строение (статiku), и функционирование (динамику) системы. Связь определяют как ограничение степени свободы элементов.

Связь можно охарактеризовать направлением, силой, характером (или видом). По первому признаку связи делят на направленные и ненаправленные. По второму — на сильные и слабые. По третьему характеру (виду) — различают связи подчинения, порождения, управления, равноправные связи. Связи можно разделить по месту приложения (на внутренние и внешние), по направленности процессов в системе в целом или в отдельных ее подсистемах (на прямые и обратные) и по некоторым более частным признакам.

Основная особенность связи – преобразование некоторой величины или пространства без изменения их физической природы. К числу основных характеристик связи относятся: физическое наполнение, направленность, мощность и роль в системе.

По физическому наполнению связи можно подразделить на вещественные, энергетические, информационные, смешанные и ненаполняемые (отношения). По

направлению различают связи: прямые, обратные, контрсвязи и нейтральные. Важной характеристикой отношений и связей является их сила (или мощность).

Очень важную роль в моделировании систем играет понятие обратной связи. Обратная связь может быть положительной, сохраняющей тенденции происходящих в системе изменений того или иного выходного параметра, и отрицательной, противодействующей тенденциям изменения выходного параметра.

*Структура* (расположение, порядок) отражает определенные взаимосвязи, взаиморасположение составных частей системы, ее устройство (строение).

*Сетевая* структура или сеть представляет собой декомпозицию системы во времени. При применении сетевых структур пользуются определенной терминологией: вершина, ребро, путь, критический путь и т.д.

*Иерархические* структуры представляют собой декомпозицию системы в пространстве.

Другими словами, системная связь – это направление передачи информации между подсистемами и ее элементами (модулями).

Для  $i$ -го элемента обобщенной сложной системы выходную функцию можно записать следующим образом (рис. 1):

$$Z = F(X, V, R),$$

где функция  $F(\cdot)$  - произвольная функция (аналогичная понятию передаточная функция в теории автоматического регулирования). В отличие от указанной теории, в данном случае функция  $F(\cdot)$  может быть детерминированной (линейной, нелинейной), статистической (закон распределения случайной величины  $Y$ ), вероятностной;

$X$  – вектор состояния системы;

$V$  – вектор возмущающих факторов;

$R$  – вектор реакций внешних воздействий.

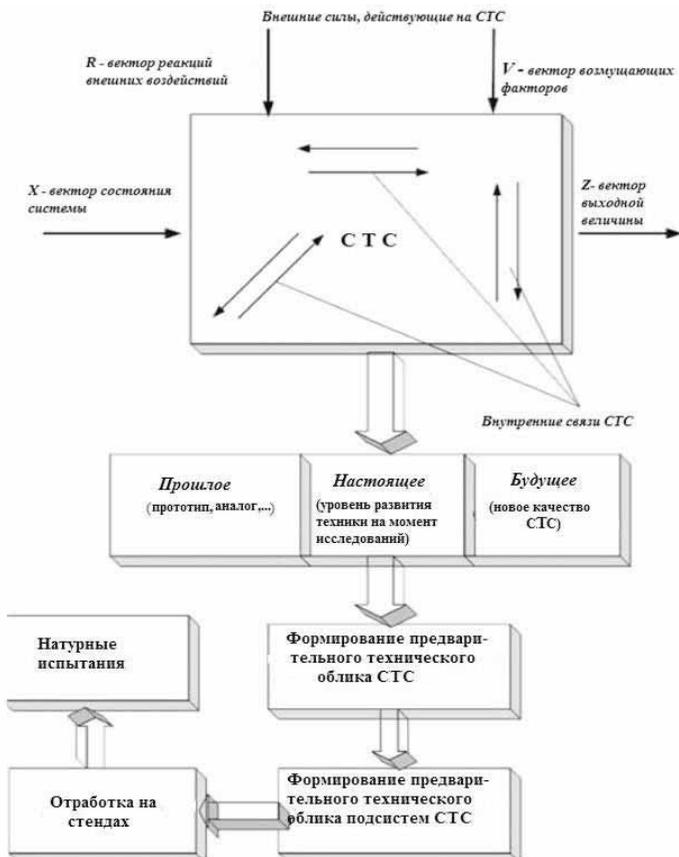


Рис. 1. Общая схема СТС и ее связей

В каждом конкретном случае, исходя из математической модели описания  $i$ -го элемента системы, записывается функция  $F(\cdot)$ , которая необходима для решения прямой и обратной задач исследования системы.

## 1.2. Системный анализ

*Приемы и методы системного анализа* направлены на выдвижение альтернативных вариантов решения конкретной проблемы, выявление масштабов

неопределенности по каждому варианту и сопоставление вариантов по их эффективности [1- 9, 26-35].

*Системный анализ* требует:

- выявления и четкого формулирования конечных целей;
- рассмотрения проблемы как единого целого и выявления всех последствий и взаимосвязей каждого частного решения;
- согласования локальной цели подсистемы с общей целью системы;
- выявления и анализа альтернативных путей достижения цели и выбор из них наиболее эффективных.

Системный анализ возник в эпоху разработки компьютерной техники. Успех его применения при решении сложных задач во многом определяется современными возможностями информационных технологий. Академик Н.Н. Моисеев приводит собственное определение: *«Системный анализ – это совокупность методов, основанных на использовании ЭВМ и ориентированных на исследование сложных систем – технических, экономических, экологических и т.д. Результатом системных исследований является, как правило, выбор вполне определенной альтернативы: плана развития региона, параметров конструкции и т.д. Поэтому истоки системного анализа, его методические концепции лежат в тех дисциплинах, которые занимаются проблемами принятия решений: теории операций и общей теории управления»*[26].

Система определяется заданием системных объектов, свойств и связей. Системные объекты – это *вход, процесс, выход, обратная связь и ограничение*.

Применение системного анализа на практике может происходить в двух ситуациях: когда исходным пунктом является возникновение *новой проблемы* и когда исходным пунктом является *новая возможность*, определенная вне непосредственной связи с данным кругом проблем. Решение проблемы проводится по следующим основным этапам: формирование проблемы, оценка ее актуальности, определение цели и различных связей, определение критериев, анализ структуры существующей системы, определение дефектных элементов существующей системы (ограничивающих получение заданного выхода), оценка их влияния на определяемые критериями выходы системы, определение структуры для формирования набора альтернатив, формирование набора альтернатив, их оценка, выбор альтернатив для осуществления, анализ процесса осуществления, согласование найденного решения, осуществление решения, оценка результатов реализации решения (рис. 2).

С 50-х годов прошлого века системный анализ применяется в экономике, сфере управления, при решении проблем освоения космоса и др. Термин «*системный анализ*» иногда употребляется как синоним *системного подхода*.

***Системный анализ:***

- *в узком смысле – это совокупность методологических средств, используемых для подготовки и обоснования решений по сложным проблемам политического, военного, социального, экономического, научного, технического характера;*
- *в широком смысле термин системный анализ иногда (особенно в англоязычной литературе) употребляют как синоним системного подхода.*

Необходимость использования методов системного анализа в целях решения сложных проблем определена тем, что в процессе принятия решений приходится осуществлять выбор в условиях неопределенности, обусловленной наличием факторов, не поддающихся строгой количественной оценке. Процедуры и методы системного анализа направлены именно на поиск альтернативных вариантов решения проблемы, выявление масштабов неопределенности по каждому из вариантов и сопоставление вариантов по тем или иным критериям эффективности. Специалисты по системному анализу только готовят или рекомендуют варианты решения, принятие же решения остается в компетенции соответствующего должностного лица (или органа) [32, 33].

Ценность системного подхода состоит в том, что рассмотрение категорий системного анализа создает основу для логического и последовательного подхода к проблеме принятия решений. Эффективность решения различных проблем с помощью системного анализа определяется их структурой.

Для решения хорошо структурированных количественно выражаемых проблем используется известная методология исследования операций, состоящая в разработке адекватной математической модели (например, задач линейного, нелинейного, динамического программирования, задачи теории массового обслуживания, теории игр и др.) и применении методов поиска оптимальной стратегии управления целенаправленными действиями.

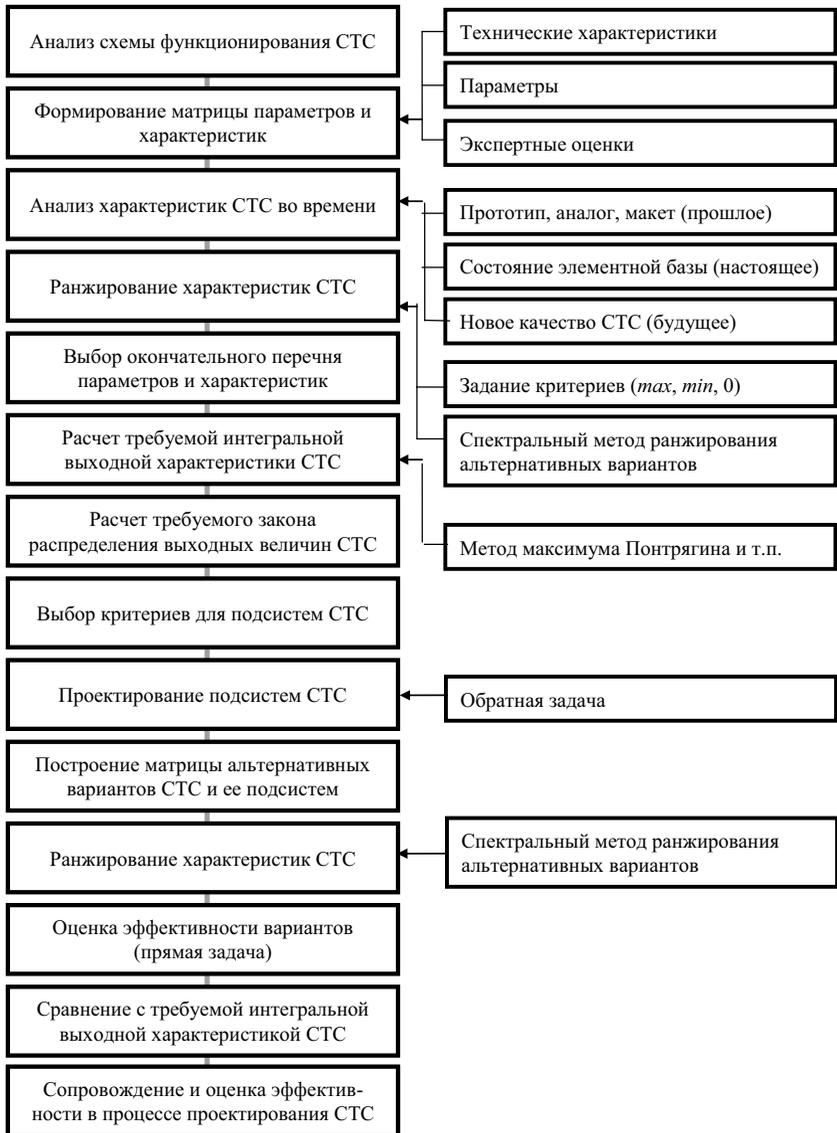


Рис. 2. Блок-схема исследования СТС

При применении системного анализа необходимо определить следующие понятия:

**Операция** – система целенаправленных действий, объединенных общим замыслом и единой целью.

**Лицо, принимающее решение** (ЛПР) – один распорядитель (основной субъект системы), с точки зрения интересов которого, всегда проводится исследование операции. Цель  $A_0$ , стоящая перед ЛПР, является единственной целью, для достижения которой проводится операция.

**Принцип декомпозиции систем** – расчленение системы на подсистемы и общей задачи на подзадачи. При этом необходимо согласование действий в подсистемах и решаемых задачах. Принцип декомпозиции позволяет снижать уровень сложности исследований.

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

Системные исследования, в зависимости от степени обобщения учитываемых факторов можно, разделить на *обобщенные* и *детальные*.

К обобщенным исследованиям относятся *концептуальные* исследования, проводимые с позиций метасистемы (надсистемы). Степень обобщения факторов здесь наиболее высокая. Далее следуют *операционные* исследования, предусматривающие более подробное изучение вариантов действий в рамках концепций, рекомендованных к дальнейшему анализу. На этом уровне определяются функциональные структуры операций, технические средства и перечень задач, ставящихся перед конкретными подсистемами (средствами), показатели и критерии их выполнения, подсистемы и связи между ними.

Детальные исследования направлены на анализ качества подсистем (агрегатов, узлов, элементов), входящих в структуры систем высшего уровня. Детальные исследования – последний уровень декомпозиции общей задачи исследования эффективности – обеспечивают решение всех вопросов, касающихся облика конкретных средств.

Концептуальные, операционные и детальные исследования, взаимно дополняя друг друга, образуют единое целое.

**Этап задачи** – условно выделяемая часть всей задачи, выполняемая одной из подсистем и направленная на решение промежуточной задачи, что предусмотрено целевым назначением данной подсистемы [5,26].

*Иерархическим уровнем* системы называется комплекс элементов  $i$ -й подсистемы, объединенных либо сугубо функциональными, либо функциональными и структурными связями для выполнения  $i$ -го этапа задачи.

*Реакцией* называется выходная характеристика одного или нескольких иерархических уровней, не рассматриваемых при проектировании  $i$ -й подсистемы, но оказывающих влияние на ее функционирование.

Результатом проведения системных исследований является набор альтернативных вариантов технического облика системы.

### 1.3. Технический облик системы

При формировании технического облика СТС используются следующие понятия [1- 9, 26-35].

*Проектные параметры*  $\{\pi_i\}$  – совокупность технических характеристик, исчерпывающе и однозначно описывающих проектируемую  $i$ -ю подсистему.

*Тактические параметры*  $\{\tau_i\}$  – совокупность характеристик, непосредственно определяющих эффективность  $i$ -й подсистемы и отражаемых в математической модели всей задачи.

*Технический облик* системы (ТО) – совокупность ее рациональных количественных характеристик, определяемых типом и составом входящих подсистем [32, 33].

Возможность создания альтернативных обликов, определяющих ТО, эффективность, надежность и целенаправленность развития систем, обеспечиваются работой множества подсистем, которые могут (или должны) выполнять различные функции систем.

*Техническое решение* системы – конкретная реализация системы (для заданных ограничений, условий применения и целевого назначения), обладающая совокупностью проектных и тактических параметров, однозначно определяющих эффективность системы и ее технический облик.

*Общий показатель эффективности* – характеристика степени выполнения задачи в целом; *частный показатель* – степень выполнения задач отдельных этапов; *обобщенный* – отдельные аспекты всей задачи или эффективность нескольких ее этапов.

*Оценка технического решения* – определение множества частных и обобщенных показателей эффективности сложной системы (при известном общем показателе),

достаточного для выдачи рекомендации о необходимости дальнейшего усовершенствования изделия в целом и доработки отдельных подсистем изделия.

**Рациональные решения** – результаты решения оптимизационных задач, в общем случае многокритериальных, полученные с некоторой неопределенной ошибкой или неточностью, обусловленной:

- компромиссным по существу подходом к решению многокритериальных задач любым методом, когда практически невозможно исключить влияние на решение субъективных факторов (например, при формировании системы ограничений);
- локальным по отношению к системам более высокого уровня характером принятого в данной оптимизационной задаче критерия;
- неполным соответствием используемой оптимизационной модели реальному процессу;
- неполным знанием характеристик (свойств) всех взаимодействующих подсистем и их взаимного влияния на уровнях, выходящих за границы исследуемой системы;
- наличием ряда возмущающих факторов с неопределенными законами распределения вероятностей;
- конфликтностью ситуации, сложностью адекватного моделирования существенных факторов, связанных с «тактикой» действия конкурента.

**Рациональные характеристики** – показатели, полученные или обоснованные в результате решения соответствующих оптимизационных задач.

**Рациональный вариант системы** – наилучший в смысле выбранного критерия вариант среди конечного набора рассматриваемых альтернатив, соответствующий всем условиям, описанным с помощью системы ограничений.

Решение задач оценки надежности и эффективности, а также определения рациональных характеристик системы на различных этапах проектирования обладает спецификой, обусловленной неопределенностью параметров проектируемой системы, направленностью исследований на поиск рациональных вариантов, неоднозначностью возможных решений задачи и т.п. В связи с этим в последние годы в России и за рубежом наблюдается тенденция к проектированию и определению путей развития сложных систем методами решения так называемых «обратных» задач.

При этом предполагается, что в качестве исходных данных фигурируют эффективность системы, условия ее применения и задача, стоящая перед системой. Одним из методов решения является многократный расчет эффективности системы с помощью полной статистической модели в целях получения табличных или графических

зависимостей между тактическими параметрами системы, при которых общий показатель ее эффективности удовлетворяет исходным требованиям. При высокой точности расчетов и возможности широкого привлечения вычислительных средств к недостаткам данного метода можно отнести невозможность оптимизации тактических параметров системы, сложность учета структурных связей между ее подсистемами и, как следствие, бесконечное множество решений задачи и трудности в обосновании путей направлений систем рассматриваемого класса.

**Базовый вариант** – вариант системы (комплекса), который проработан в конструктивном плане и является типовым для других возможных вариантов.

#### 1.4. Обобщенная схема системного анализа

Для оценки надежности, эффективности функционирования и технических характеристик сложной технической системы в общем случае должны быть сформированы:

- целевое назначение, т.е. основная задача, поставленная перед системой;
- критерий выполнения целевого назначения, выработанный на основе показателей, зависящих от параметров системы;
- перечень существующих или разрабатываемых систем, принципиально способных выполнить поставленную задачу.

Первым шагом для решения поставленных задач является анализ системы как сложной системы с детальной квантификацией<sup>1</sup> подсистем, вариация параметров которых является наименее проблематичной с точки зрения технической реализации.

Для использования методов анализа систем необходимо формирование частных и обобщенных показателей, характеризующих степень выполнения подсистемами собственных целевых задач. Одним из таких показателей является значимость множества проектных и тактических параметров подсистемы, необходимых для выполнения задачи в целом. В целях формирования таких показателей вводится новое понятие - вклад подсистемы в конечный результат функционирования системы.

Для определения ТО системы в соответствии с общими задачами системы необходимо сформировать:

- перечень задач  $\{Z_i\}$ , решаемых подсистемами;

---

<sup>1</sup> Квантификация – измерение качества, признаков

- перечень функций  $\{\Phi_i\}$ , обеспечивающих выполнение задач, в данном случае  $\Phi_i$  есть зависимость показателя эффективности  $i$ -й подсистемы от ее параметров;
- перечень подсистем  $\{S_i\}$ , реализующих данные функции;  
 $i=1, \dots, n$ , где  $n$  – число подсистем сложной системы, полученное в результате анализа.

Каждый из указанных перечней имеет иерархическую структуру, причем одинаковые уровни иерархии всех трех перечней соответствуют друг другу.

В табл. 1 представлена иерархическая структура задач, функций и обеспечивающих подсистем (существующих или предполагаемых к разработке) в соответствии с принятым разбиением. Процесс выполнения задачи представляется в виде последовательности этапов, на каждом из которых подсистема или совокупность подсистем решает промежуточную задачу для реализации основной функции системы.

Таблица 1. Иерархическая структура задач

Номер задачи	Этап задачи $\{Z_i\}$	Реализуемая функция $\Phi_i$	Подсистема $S_i$
1	Исходное состояние	$\Phi_1$	Исходное состояние учитывает реакцию надсистемы $S_1$
2	Информационное обеспечение	$\Phi_2$	Информация о системе (о прототипах и т.п.)
3	Принятие решения, логика работы системы	$\Phi_3$	ЛПР
4	Подготовительные действия в системе	$\Phi_4$	СТС
5	Результаты функционирования системы	$\Phi_5$	СПС

Последовательное изображение множества  $\{Z_i\}$  в  $\{\Phi_i\}$  и  $\{S_i\}$  представляет собой выбор ТО. Исходными данными для выбора ТО являются множество  $\{Z_i\}$ , характеристики внешних условий и перечень проектных и тактических параметров  $\{\pi_{ij}\}$  и  $\{\tau_{ij}\}$ , характеризующих каждый из элементов множества  $\{S_i\}$ ;  $i=1, \dots, 5$ ,  $j=1, \dots, q$ , где  $q$  – число параметров, характеризующих  $i$ -ю подсистему.

В работах [1, 5, 32] показано, что решение задачи выбора ТО методом непосредственного расчета общего показателя эффективности множества вариантов системы не всегда представляется возможным. Наиболее предпочтительным методом решения подобных задач является оптимизация параметров системы по частным и обобщенным критериям. В качестве показателей эффективности выполнения отдельных этапов задачи данные критерии обычно используют значимость или вклад  $i$ -й подсистемы в общий результат выполнения задачи –  $U_i\{\tau_{ij}\}$ .

Таблица 2. Этапы функционирования системы

Номер этапа	Этап задачи $\{Z_i\}$	Реализуемая функция $\Phi_i$ , тактические параметры $\tau_{ij}$	Подсистема проектные параметры $\lambda_{ij}$ $S_i$ ,
1	Получение информации от внешнего источника $\{Z_1\}$	$\Phi_1$ : закон распределения	Средства доставки (учитываются в реакции средств доставки): $S_1$
2	Доставка системы в район функционирования $\{Z_2\}$	$\Phi_2$ : ошибки доставки	Носители (самолет, вертолет) учитываются в виде реакции $S_2$
3	Работа системы управления $\{Z_3\}$	$\Phi_3$ :выбираемый системой промах относительно объекта	Система коррекции: $S_3$
4	Наведение СТС $\{Z_4\}$	$\Phi_4$ : закон распределения величин после окончания процесса наведения	Системы наведения: $S_4$
5	Попадание системы в объект при условии его нахождения в зоне обзора информационного блока (ИБ) системы $\{Z_5\}$	$\Phi_5$ : вероятность попадания системы в заданный объект при условии его попадания в зону обзора ИБ (если имеется)	Система ИБ: $S_5$

Для формирования частных и обобщенных показателей необходимо проведение анализа множества  $\{\Phi_i\{\tau_{ij}\}\}$ . В результате такого анализа формируется однозначное соответствие  $\Phi_i\{\tau_{ij}\} - U_i\{\tau_{ij}\}$  для всех этапов выполнения задачи ( $i=1, \dots, n$ ). Кроме того, необходимо обоснование правомочности сравнения систем по выбранным показателям для заданного диапазона неопределенности характеристик внешних условий. Минимальные значения обобщенных показателей эффективности функционирования подсистем в общем результате решения задачи определяются путем оптимизации тактических параметров подсистем  $\{\tau_{ij}\}$ .

Использование предлагаемого подхода может существенно облегчить процессы поиска и обоснования направлений развития системы, оценки эффективности и надежности разрабатываемых технических решений блоков и узлов системы. Для максимального сокращения времени исследования, возможности дополнения множества  $\{S_i\}$  вновь созданными подсистемами, учета нетрадиционных элементов в множествах  $\{S_i\}$  и  $\{\Phi_i\}$  и т.п. процесс выбора направлений развития системы должен быть максимально автоматизирован.

Следует иметь в виду, что приведенные в табл. 1 и 2 структура задач и этапы могут быть использованы в качестве основных при проектировании подсистемы СТС, например

информационного блока (ИБ). В этом случае все формулировки переделываются под задачи и функции соответственно ИБ.

Примером применения данного подхода является разработка самонаводящейся парашютной системы для доставки грузов в труднодоступные и опасные районы Земли, для проведения экологического мониторинга указанных районов [10-20], разработка парапланной автоматической системы [3, 23].

### 1.5. Система критериев. Принципы системного анализа

Вопросы определения и выбора критериев эффективности системы рассматриваются практически в каждой работе, посвященной исследованию и проектированию конкретных изделий (систем, комплексов).

Ранее было отмечено, что под критерием эффективности понимается признак, с помощью которого производится сравнительная оценка альтернатив и выбор наилучшей из них. Характеристика, количественно выражающая степень выполнения системой поставленной задачи и позволяющая судить об эффективности процесса, называется показателем эффективности. Различают общий показатель эффективности, частный и обобщенный.

Наиболее подробно подобные критерии рассмотрены в работе [32], причем при сравнении вариантов системы (или их элементов) предлагается учитывать показатели эффективности  $W$ , затраты  $C$  и сроки создания системы  $T$ . Исходя из основных принципов выбора критериев эффективности [32], можно построить множество критериев оценки и выбора параметров ТО, которое при простоте и наглядности удовлетворяло бы принципу непротиворечивости частных показателей эффективности общему.

Множество может включать различные критерии: *аддитивные, мультипликативные, минимаксные*. Важно, чтобы это множество было увязано со схемой функционирования системы от постановки задачи до ее выполнения, а также с видом задачи, решаемой на этапе проектирования – прямой или обратной.

Основная задача направлена на выбор параметров проектируемого изделия и выдачу рекомендаций по его использованию. Обратная задача состоит в выборе необходимых характеристик (параметров) подсистем и уточнении облика системы. Задачи и критерии системы приведены в табл. 3, из анализа которой следует триединство задач, критериев и роли собственно исследуемой системы.

Таблица 3. Задачи и критерии

Система и уровень	Задачи	Требуемые модели, методики	Критерий эффективности	Количественные показатели	Примечание
Надсистема, I	Общая задача, стоящая перед системой	Технический облик системы и требования к интегральным характеристикам системы	$U$ – допустимый уровень эффективности; $N$ – требуемое число образцов	$P$ – суммарный показатель; $MGX(d,i,m)$ , $F_{распр}(x,y)$	Уровень системы – подсистема надсистемы (например, производство образцов в стране, регионе, городе)
Система, II	Создание технического образца	Система и требования к подсистемам	Закон распределения	Законы распределения $F_i$ и массогабаритные размеры	СТС (СПС) как автономная система
Подсистема, III	Создание блоков и узлов системы	Блоки системы (информационный блок и т.п.)	Вероятностные характеристики по подсистемам	Параметры подсистем	Информационный блок (ИБ) как подсистема и т.п.

На первом уровне система выступает как подсистема надсистемы, на втором уровне система рассматривается как самостоятельная, автономная система (например, СТС), на третьем уровне – система является надсистемой, по отношению к соответствующим подсистемам. Таким образом, на втором уровне формируется конечный результат – технический облик системы, который учитывает ограничения и связи надсистемы (уровень I) и параметры своих подсистем (уровень III).

Правомочность критерия, согласно [32, 33], вытекает из следующего правила: если для произвольной функции вида

$$N = N(\{\tau_j\}_i, \{\pi_j\}_i, \{C_e\}) = f[\varphi_j(\{\tau_j\}_i, \{\pi_j\}_i, \{C_e\}), \psi(K_i(\{\tau_j\}_i, \{\pi_j\}_i))]$$

выполняется условие  $\partial N / \partial \psi_i > 0 \cap \partial \psi_i / \partial K_i < 0$ , критерий  $K_i(\{\tau_j\}_i, \{\pi_j\}_i) = \max$  (более подробно см. далее). Как показывает опыт проектирования систем различного вида, помимо указанной системы критериев, обычно требуются различные частные критерии оценки как конкретных технических решений, так и отдельных подэтапов функционирования системы.

В зависимости от постановки задачи и описания математической модели сложной системы критерии качества разделяются на детерминированные, вероятностные, минимаксные.

*Детерминированные* критерии соответствуют детерминированной модели, *вероятностные* – стохастическому описанию, *минимаксные* – описанию системы с учетом априорной неопределенности о характеристиках и условиях применения.

*Общий показатель эффективности* системы  $K_0$  должен характеризовать выполнение системой поставленной задачи.

В детерминированной постановке  $K_0$  принимает два значения:  $K_0 = 1$ , если задача выполнена, и  $K_0 = 0$ , если задача не выполнена. В вероятностной постановке  $K_0 = P_0$  – вероятность выполнения поставленной задачи. В минимаксной  $K_0 = \min P_0$  – минимальное по характеристикам априорной неопределенности значение вероятности выполнения поставленной задачи.

В дальнейшем минимаксные критерии отдельно не рассматриваются. Они могут быть получены аналогичным образом из вероятностных или детерминированных (более подробно см., например, в [32]).

К *основным принципам системного анализа* относятся:

- взаимосвязь и развитие;
- зависимость (связанность);
- независимость (автономность);
- качественное отличие части и целого;
- системность;
- иерархичность;
- интеграция (базисные, интегративные свойства системы);
- формализация (создание конструктивных методов описания, анализа и синтеза систем).

Введем еще несколько понятий.

**Состояние** – обычно характеризует мгновенную фотографию, «срез» системы, остановку в ее развитии. Состояние определяют либо с помощью входных воздействий и выходных сигналов (результатов), либо с помощью макропараметров, макросвойств системы (давление, скорость, ускорение).

**Поведение** – если система способна переходить из одного состояния в другое (например,  $s_1 < s_2 < s_3$ ), то считается, что она обладает поведением.

**Равновесие** – способность системы при отсутствии внешних возмущающих воздействий (или при постоянных воздействиях) сохранять свое поведение сколь угодно долго.

**Устойчивость** – способность системы возвращаться в состояние равновесия после того, как она была из этого состояния выведена под влиянием внешних возмущающих воздействий.

**Целостность** – проявляется при возникновении у системы ее «новых интегративных качеств, не свойственных ее компонентам». Чтобы глубже понять закономерность целостности, необходимо учитывать две ее стороны:

1. свойства системы (целого)  $Q_s$  не являются суммой свойств элементов (частей)

$$q_1 : Q_s \neq \sum_{i=1}^n q_i$$

2. свойства системы (целого) зависят от свойств элементов (частей):

$$Q_s = f(q_i).$$

Следует иметь в виду, что объединенные в систему элементы способны терять ряд свойств, присущих им как системе в целом, т.е. система как бы подавляет некоторые свойства своих элементов.

Исследование иерархической упорядоченности системы с использованием информационного подхода показывает, что между уровнями и элементами иерархических систем существуют более сложные взаимосвязи, чем это может быть отражено в графическом изображении иерархической структуры.

## 1.6. Методология применения системного анализа

Рассмотрим технологию применения системного анализа при решении сложных задач.

Процедура принятия решений может включать следующие основные этапы :

- формулировку проблемной ситуации;
- определение целей;
- определение критериев достижения целей;
- построение моделей для обоснования решений;
- поиск оптимального (допустимого) варианта решения;
- согласование решения;
- подготовку решения к реализации;
- утверждение решения;
- управление ходом реализации решения;

— проверку эффективности решения.

С учетом понятий и определений системного анализа, введенных в работах [1- 9], сформируем методологию применения теории к исследованию технических систем.

1. Исходя из целевой задачи  $U$ , система представляется в виде подсистем и множества элементов (модулей). Декомпозиция системы проводится таким образом, что вид критериев и результатов записывается в зависимости от вида системы, ее сложности, вида описания системных связей и т.п.
2. Иерархическое представление системы осуществляется в соответствии с рис. 3.
3. Записываются таблицы критериев и результатов в виде, приведенном в табл. 4. Вид функций  $\mathcal{E}_i$ ,  $i=1,2,3$ ; величин  $N$ ,  $P$ ,  $P_{ivc}$  соответствует конкретной системе или подсистемам (индекс: п/с): СТС и/или СПС, ИБ,СУ и т.п..
4. Каждую подсистему, входящую в систему, представляем в виде, аналогичном рис. 3, но с данными, полученными на предыдущем уровне.
5. На 3-м уровне исследования системы представляем каждый элемент (модуль), входящий в СТС и/или СПС. Критерий и ограничения на элемент выбираются по результатам исследований 2-го уровня; математическая модель  $i$ -го элемента системы записывается в любом виде (аналитическом, численном, имитационном, статистическом, табличном, графическом).
6. Проводится решение прямой и обратной задач для каждого  $i$ -го элемента системы, СТС, СПС.
7. Результаты исследований, полученные в п.6, совместно с результатами 1-го уровня (анализ надсистемы) используется на 2-м уровне исследований для окончательного формирования множества альтернативных вариантов системы.
8. Полученное в п.7 множество альтернативных вариантов системы ранжируется с помощью спектрального метода (см. [1-9]).
9. На основании результатов в п.8 выбирается **рациональный вариант системы**, который может быть рекомендован к проектированию и дальнейшей реализации.

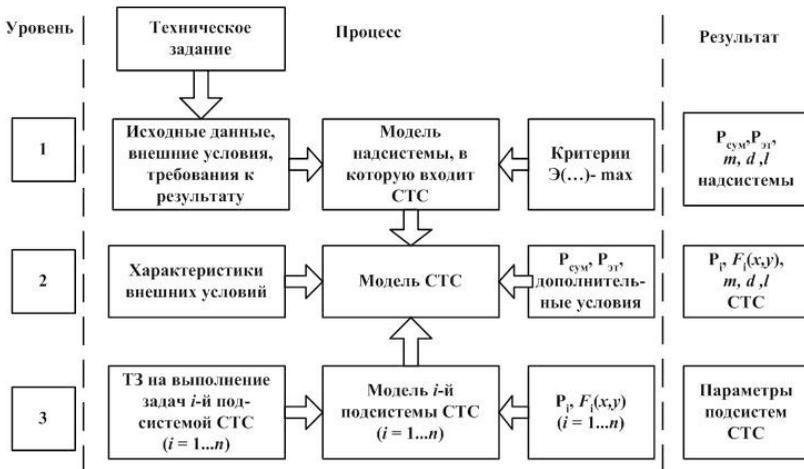


Рис. 3. Уровни представления технической системы

$P_i$  – вероятности выполнения задачи  $i$ -й подсистемы СТС;  $F_i(x, y)$  – закон распределения параметров;  $m, d, l$  – массагабаритные размеры;  $P_{\text{эт}}$  – эталонная величина вероятности выполнения задачи;  $n$  – число подсистем;  $P_{\text{сум}}$  – суммарная вероятность выполнения поставленной задачи

Таблица 4. Общее представление критериев и результатов

Условие	Критерий уровня	Результат
$\frac{\partial \mathcal{E}_1}{\partial \mathcal{E}_2} > 0 \cap \frac{\partial \mathcal{E}_2}{\partial \mathcal{E}_3} > 0 \Rightarrow \mathcal{E}_3(\tau) \rightarrow \max$	$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_{\text{СТС}}$	1-й уровень Надсистема $N$
	$\mathcal{E}_2$	2-й уровень
	$\mathcal{E}_{\text{СТС}}$	СТС $P_{\Sigma \text{СТС}}$
	$\mathcal{E}_{\text{СПС}}$	СПС $P_{\Sigma \text{СПС}}$
	$\mathcal{E}_3$	3-й уровень
	$\mathcal{E}_{\text{СТС}}$	$i$ -я подсистема $P_{i \text{ в } c}$
$\mathcal{E}_{\text{СПС}}$	$i$ -я подсистема $P_{i \text{ в } c}$	

Отметим, что, например, подсистема ИБ входит в состав как СТС, так и СПС. Задачи, решаемые этим модулем, определяются исходя из требований, предъявляемых к информации в СТС и в СПС соответственно.

$\mathcal{E}_i$  – критерий эффективности функционирования  $i$ -го уровня;  $N, P_i$  и/с – обобщенный результат для каждого уровня (определяется конкретным содержанием системы).

Условие, приведенное в первом столбце таблицы, будет подробно рассмотрено далее.

### 1.7. Прямая и обратная задачи

В прямой задаче возможность широкой вариации параметров проектируемого изделия принципиально может быть обеспечена следующим образом [1]:

- организацией итерационного процесса проектных проработок;
- обеспечением обратной связи результатов исследований эффективности и проектных проработок;
- формированием для разработчиков исходных данных, определяемых на базе предварительных исследований эффективности.

Далее рассматривается метод решения «обратной» задачи, основанный на оптимизации проектных и тактических параметров системы. Достоинством такого подхода является получение конечного и дискретного ряда вариантов системы, каждый из которых имеет оптимальные (по выбранным критериям) проектные и тактические параметры и удовлетворяет исходным требованиям по эффективности. Ввод обоснованного дискретного ряда альтернатив дает возможность их ранжирования по обобщенным показателям (так как общие показатели эффективности у всех вариантов примерно равны) в целях определения вариантов для дальнейшей реализации.

*Обратная задача* – для процессов, протекающих во времени состоит в восстановлении ситуации прежнего времени. Эта задача не всегда разрешима даже в ситуациях наличия решения прямой задачи. Так, в классической механике решается и прямая, и обратная задача, а в теплофизике – только прямая.

Иногда обратная задача, т. е. задача, соответствующая функции  $f^{-1}(Y)=X$ , решается значительно более просто, чем исходная задача. Тогда имеющийся алгоритм решения обратной задачи  $R$  иногда можно использовать для составления алгоритма решения прямой задачи  $P$ .

Если для решения прямой задачи достаточно знать одну причинно-следственную связь, то для успешного решения обратной задачи этого явно недостаточно и необходимо учитывать многие причинно-следственные связи, характерные для изучаемого процесса, и, следовательно, обладать гораздо более богатым опытом и экспериментальным материалом, чем для решения прямой задачи.

В математике известно, что подавляющее большинство обратных задач являются некорректно поставленными. Малым возмущениям исходных данных (данных наблюдений) могут соответствовать сколь угодно большие возмущения решения. Как отмечено французским ученым Ж. Адамаром в 1939 г., задача называется *корректно поставленной (корректной)*, если ее решение:

- существует,
- единственно,
- непрерывно зависит от входных данных, т.е. устойчиво по отношению к малым возмущениям (ошибкам) данных наблюдений.

Если хотя бы одно из указанных условий не выполняется, задача называется *некорректно поставленной*.

Одним из направлений в решении обратных задач является подход, основанный на оптимизации проектных и тактических параметров системы, позволяющий учитывать структурные связи подсистем и их влияние на общий, частный и обобщенный показатели эффективности.

К основным достоинствам такого подхода относятся следующие.

Во-первых, когда результат его применения представляет собой конечный, дискретный ряд вариантов подсистем, каждый из которых удовлетворяет требованиям эффективности. Все варианты имеют оптимальные проектные и тактические параметры согласно выбранным критериям эффективности.

Во-вторых, когда обоснованный ряд альтернативных вариантов ранжируется по обобщенным показателям эффективности и для дальнейшей реализации выбирается лучший.

В-третьих, когда иерархия подсистем рассматривается с учетом системных связей между собой как на одном уровне, так и между подсистемами на разных уровнях. Система представляется не только как самостоятельная, но и как подуровень надсистемы, наиболее общей в представлении общего класса сложных систем. Надсистема увязывает в одну структуру многие параметры системы, совместное рассмотрение которых другими способами не представляется возможным.

Так как решение обратной задачи представляет собой определение характеристик оптимального закона распределения ошибок системы и эталонного закона, определяемого на основе выводов и соотношений теории эффективности, то на втором этапе определяется эталонный закон.

Эталонный закон – это фактически идеальное решение поставленной перед системой задачи.

**Пример 1.1.** Пусть необходимо записать закон распределения точек попадания роботов на площадь  $S$  при ошибках наведения  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$ , а также выбрать эталонный закон распределения [5].

Реальный вид закона распределения точек попадания определяется композицией законов распределения точек индикации места попадания и точек наведения в это место

$$f_n = f_u f_n.$$

Для нормального закона распределения точек индикации

$$f_u(x, z) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-M_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(z-M_z)^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

и в случае попадания в центр площадки места попадания закон  $f_n$  имеет вид:

$$f_n(\eta, \xi) = \frac{1}{2\pi\sigma_\eta\sigma_\xi} \exp\left[-\frac{(\eta-M_\eta)^2}{2\sigma_\eta^2} - \frac{(\xi-M_\xi)^2}{2\sigma_\xi^2}\right],$$

где

$$M_\eta = M_x + M_{\text{цпх}}; \quad M_\xi = M_z + M_{\text{цпз}}; \quad \sigma_\eta^2 = \sigma_x^2 + \sigma_{\text{цпх}}^2; \quad \sigma_\xi^2 = \sigma_z^2 + \sigma_{\text{цпз}}^2.$$

При равномерном законе распределения точек индикации по площади  $\left[M_x - l_x; M_x + l_x; M_z - l_z; M_z + l_z\right]$  и  $M_{\text{цп}} = M$  выражение для плотности вероятности  $f_n(\eta, \xi)$  имеет вид:

$$f_n(\eta, \xi) = \frac{1}{16l_x l_z} \left[ \hat{\Phi}\left(\frac{\eta - 2M_x + l_x}{\sigma_{\text{цпх}}}\right) - \hat{\Phi}\left(\frac{\eta - 2M_x - l_x}{\sigma_{\text{цпх}}}\right) \right] \times \left[ \hat{\Phi}\left(\frac{\xi - 2M_z + l_z}{\sigma_{\text{цпз}}}\right) - \hat{\Phi}\left(\frac{\xi - 2M_z - l_z}{\sigma_{\text{цпз}}}\right) \right],$$

где  $\hat{\Phi}(y) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ , и может быть заменено нормальным законом [5] причем

$$M_\eta = 2M_x; \quad M_\xi = 2M_z; \quad \sigma_\eta^2 = \sigma_{\text{цпх}}^2 + \frac{1}{3}l_x^2; \quad \sigma_\xi^2 = \sigma_{\text{цпз}}^2 + \frac{1}{3}l_z^2.$$

Для обоих случаев в качестве эталонного закона выбирается равномерный закон распределения точек попадания по площади

$$f(x) = \frac{1}{2l_x}, \quad M_x - l_x < x < M_x + l_x;$$

$$f(z) = \frac{1}{2l_z}, \quad M_z - l_z < z < M_z + l_z.$$

В общем случае, исходя из требований поставленной задачи, проводится расчет эффективности применения данного средства и определяется вид эталонного закона. Далее проводится собственно оптимизация задачи. Согласно (1.1) математически задача представляет собой минимизацию выражения

$$D(F(x, z)) = \min_{\sigma_p} \left\{ \max_{x, z} \left| F(f_p(x, z), F_1(x, z)) - F^{эм}(x, z) \right| \right\},$$

где  $D()$  – показатель критерия согласия Колмогорова;

$F(f_p(x, z), F_1(x, z))$  – закон разброса СТС, полученный с учетом ошибок доставки носителем;

$f_p(x, z)$  – закон разброса группы СТС;

$F^{эм}(x, z)$  – эталонный закон распределения СТС.

При отсутствии корреляции по осям можно применить однопараметрическую оптимизацию методом Фибоначчи [40]. По результатам оптимизации строятся графики и номограммы, используемые при проектировании рассмотренной подсистемы, уровня, всей системы или комплекса в целом.

Возможны следующие случаи решения обратных задач:

1. Оптимизация характеристик подсистем СТС по вероятности (рис. 4)

— на основе различных данных (математических, экспериментальных, экспертных) записывается функция параметров  $i$ -й подсистемы СТС как функция вероятности выполнения задачи от параметров :

$$\alpha_i, \beta_i \Rightarrow P_i(\alpha_i, \beta_i),$$

— применяя любой известный метод оптимизации (например, методы Фибоначчи, Хука-Дживиса, градиентные, метод перебора), можно определить параметры, удовлетворяющие условию

$$|P_i^{треб} - P_i(\alpha_i, \beta_i)| < \varepsilon_0,$$

где  $P_i^{треб}$  - требуемая величина (эталонная), определенная на предыдущем уровне иерархии для  $i$ -й подсистемы СТС;  $\varepsilon_0$  - заданная точность расчетов.

2. Оптимизация характеристик подсистемы СТС по закону распределения

$$D(F_j(\alpha_j, \beta_j)) = \min_{\sigma} \left\{ \max_{\alpha} |F_j^{mp\epsilon b} - F_j(\alpha_j, \beta_j)| \right\},$$

где  $D$  – показатель критерия согласия Колмогорова;

$F_j^{mp\epsilon b}$  – эталонный оптимальный закон распределения величины;

$F_j(\alpha_j, \beta_j)$  – закон распределения в функции параметров подсистемы СТС.

3. Оптимизация ресурсных характеристик подсистемы СТС проводится по схеме, приведенной на рис.5, причем оптимизация проводится до выполнения условия:

$|R^{тр\epsilon b} - \Sigma R_i| < \epsilon_0$ , где  $R_i$  – ресурсные характеристики подсистемы СТС,  $\epsilon_0$  – заданная

точность расчетов.

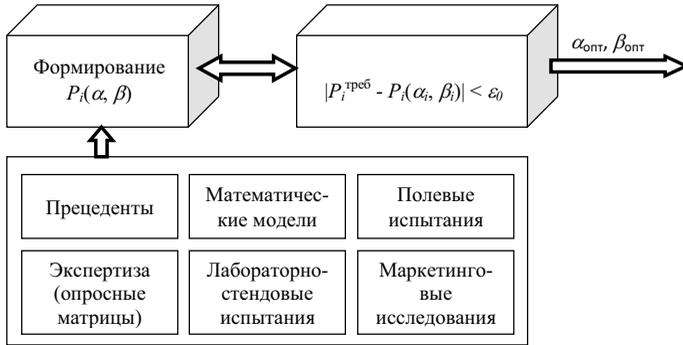


Рис. 4. Схема оптимизации характеристик

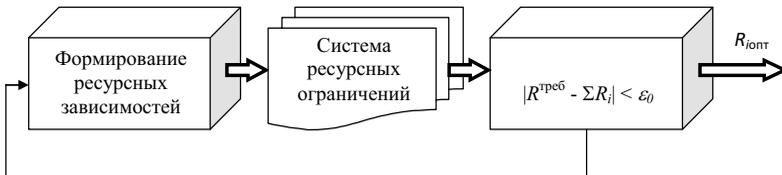


Рис. 5. Оптимизация ресурсных характеристик

В каждом из перечисленных трех случаев составляется матрица оптимальных вариантов технических решений СТС, которые ранжируются по способу, изложенному в работах [1-9]. По результатам ранжирования выбираются наиболее рациональные технические решения подсистемы, которые могут быть рекомендованы для последующих этапов реализации, проектирования и испытаний.

Заметим, что в случае отсутствия аналитических зависимостей можно записать функции и зависимости на основе интерполяции табличных величин или на основе обработки выходных величин отдельного модуля (блока) и определения закона распределения величин.

## 1.8. Декомпозиция системы

*Декомпозиция* – научный метод, использующий структуру задачи и позволяющий заменить решение одной большой задачи решением серии меньших задач. Существуют различные подходы к решению задачи декомпозиции.

На этапе декомпозиции, обеспечивающем общее представление о решаемой проблеме, осуществляются:

- определение и декомпозиция общей цели исследования;
- выделение проблемы из среды, определение ее ближнего и дальнего окружения;
- описание воздействующих факторов.

Наиболее часто декомпозиция проводится путем построения дерева целей и дерева функций. Основной проблемой при этом является соблюдение двух противоречивых принципов:

- *полноты* – проблема должна быть рассмотрена максимально всесторонне и подробно;
- *простоты* – все дерево должно быть максимально компактным вширь и вглубь. Компромисс достигается с помощью четырёх основополагающих понятий:
  - *существенности* – в модель включаются только компоненты, существенные по отношению к целям анализа;
  - *элементарности* – доведение декомпозиции до простого, понятного, реализуемого результата;
  - *постепенной детализации модели*;
  - *итеративности* – возможность введения новых элементов в основания и продолжение декомпозиции по ним на разных ветвях дерева.

Ранее было отмечено, что при проектировании системы необходима процедура декомпозиции. Методика проведения декомпозиции системы, т.е. процедура разложения системы на системные составляющие, позволяет представить систему в виде совокупности уровней, подсистем, блоков, модулей

1. Для чернового (первичного) разбиения систему представляют в виде уровней, блоков, модулей (подсистем), исходя из опыта проектирования и физических основ построения и функционирования системы.
2. Записывается общий критерий функционирования системы (например, максимум эффективности при заданном числе товаров, максимум прибыли при ограниченном финансировании проекта, максимальная точность доставки при ограничении на массовые параметры системы и т.п.). Критерий определяется техническим заданием, заданием заказчика, задачами проектирования и т.п. Записываются частные и обобщенные критерии функционирования на каждом выделенном уровне и для каждой подсистемы, приводятся все системные связи. Осуществляется поверочный расчет правомочности выбора таких критериев по специальному правилу.
3. Если критерии не удовлетворяют правилу правомочности, то изменяют критерии на данном уровне или для подсистемы.
4. Если в результате изменения вида критериев не удалось достигнуть выполнения правила правомочности, необходимо возвратиться к п. 1 и переопределить уровни, блоки и модули разбиения системы. В этом случае разбиение системы производят на основе анализа первоначального выбора системы критериев и тех узких мест, где не выполняется правило правомочности.
5. Повторяются пункты 2...4.
6. При необходимости итерационный процесс выбора системы критериев повторяется для уровней, блоков и модулей разбиения системы до тех пор, пока для всей системы критериев не будет выполняться правило правомочности.

Выбор критерия осуществляется следующим образом:

- для  $i$ -го модуля записывается известный критерий (например, для двигателя можно выбрать критерий – максимальную частоту вращения при ограничении на мощность двигателя);
- по правилу предпочтения находится соответствие общему критерию эффективности;
- если правило предпочтения не выполняется, осуществляется переопределение критерия для  $i$ -го модуля.

Число уровней, блоков и модулей представления структуры системы следующее:

Число уровней может быть только три: внешний (уровень *надсистемы*), собственно *система, подсистемы* (блоки и модули).

Число блоков и модулей может состоять из постоянного для любых типов систем набора, переменного набора или временного набора.

К *постоянному* набору относятся, например, информационный блок, блок обработки информации, управляющий блок, исполнительный блок.

К *переменному* составу могут относиться блок установки начальных условий, блок установки дополнительных ограничений, блок связей с другими СТС, блок шифровки и дешифровки исходной информации и т.п.

К *временному* составу относятся блоки временного хранения информации.

Систему можно разложить на системные составляющие по следующим принципам:

- по физической сущности задач, решаемых системой и ее подсистемами;
- по критериям функционирования системы и ее подсистем;
- по важности и значимости модулей, входящих в структуру системы.

При этом остается неформализованной задача определения предела делимости системы на модули. Ясно, что доходить до болтов и гаек при таком проектировании нет необходимости. Но определение минимального размера модуля должно проводиться проектировщиком, исходя из приведенных ранее трех принципов системного разложения системы.

### **1.9. Представление общего функционала в виде составляющих по блокам структуры комплекса**

Согласно методологии системного анализа общий критерий функционирования системы записывается в функции критериев всех уровней декомпозиции системы таким образом, что из общего критерия  $\mathcal{E}_{система} = F_{треб}(\mathcal{E}_i)$ , где  $F_{треб}(\mathcal{E}_i)$  – требуемый функционал качества системы, определяются требуемые критерии для нижестоящих уровней проектирования:  $P_i, F_i, R_i$ . Здесь  $P_i$  – вероятность выполнения задачи  $i$ -й подсистемы,  $F_i$  – закон распределения выходной величины и  $R_i$  – величина выходного параметра для  $i$ -й подсистемы. Предполагается, что зависимости  $P_i(\alpha, \beta), F_i(\alpha, \beta), R_i(\alpha, \beta)$  для  $i$ -й подсистемы известны [5,32,33].

Задача состоит в представлении общего функционала  $\mathcal{E}_{система}$  в виде совокупности обобщенных и частных критериев, при этом необходимо выполнение условия непротиворечивости. Следует иметь в виду, что выполнение критерия непротиворечивости общему критерию обязательно. Это означает следующее.

Пусть показатель эффективности *системы* можно записать [1]:

$$W(\{\alpha\}, \{\beta\}) = f\{\varphi(\{\alpha\}), \{\beta\}\}, \psi[K(\{\alpha\})],$$

где  $\varphi(\{\alpha\}, \{\beta\})$  – функция, отражающая степень влияния параметров системы  $\{\alpha\}$  на показатель эффективности в зависимости от значений неопределенных условий  $\{\beta\}$ ;

$\psi[K(\{\alpha\})]$  – функция, определяемая только параметрами системы и независимая от неопределенных параметров;

$K(\{\alpha\})$  – обобщенный показатель, зависящий от характеристик проектируемого изделия.

Пусть обобщенный показатель  $K(\{\alpha\})$  сформирован в таком виде, что выполняется условие  $K(\{\alpha\}_1) > K(\{\alpha\}_2)$ , и требуется, чтобы в рассматриваемом диапазоне неопределенности выполнялись условия:

а)  $\partial W / \partial \psi > 0$ ,  $\partial \psi / \partial K < 0$ , если показателем эффективности является число единиц продукции (систем, товара и т.п.), потребное для решения задачи с заданными условиями (рис. 6,а);

б)  $\partial W / \partial \psi > 0$ ,  $\partial \psi / \partial K > 0$ , если показателем является степень выполнения задачи  $\mathcal{E}$  при заданном числе единиц продукции (систем) (рис. 6,б).

Тогда для сравнения вариантов в диапазоне неопределенности можно использовать обобщенный показатель характеристик проектируемого элемента  $K(\{\alpha\})$ , причем условие отбраковки вариантов для принятых предположений формируется следующим образом: если  $K = K(\{\alpha\}_1) / K(\{\alpha\}_2) > 1$ , то вариант  $K(\{\alpha\}_2)$  может быть исключен из дальнейшего рассмотрения.

Пусть общий критерий эффективности:  $\mathcal{E} = f(\alpha, \beta)$ , причем критерий  $i$ -го модуля  $\mathcal{E}_i$ . Проверяем правило предпочтительности:

$$k_{np} = R(\mathcal{E}, \mathcal{E}_i) = R(K),$$

где  $R = E_1(\cdot)$  – целая часть числа, заключенного в скобки;

$$k_{np} = \begin{cases} \geq 1, & \text{критерий } \mathcal{E}_i \text{ соответствует общему критерию и может использоваться;} \\ 0, & \text{критерий не соответствует.} \end{cases}$$

Если  $k_{np} = 0$ , необходимо изменить критерий  $\mathcal{E}_i$ , на основе анализа общего критерия  $\mathcal{E}$  и результатов  $R_1$  и  $R_2$ , где  $R_1 = \text{sign}\{\partial W / \partial \Psi\}$ ;  $R_2 = \text{sign}\{\partial \Psi / \partial K\}$ ,  $\text{sign}\{\cdot\}$  – знак числа выражения в скобках.

Заметим, что невозможность представления показателя эффективности  $W(\{\alpha\}, \{\beta\})$  в том виде, как это представлено в разделе, означает невозможность построения одного обобщенного показателя, достаточного для сравнения вариантов. Представление критерия в виде  $W(\{\alpha\}, \{\beta\})$  эквивалентно сравнению вариантов по одному показателю.

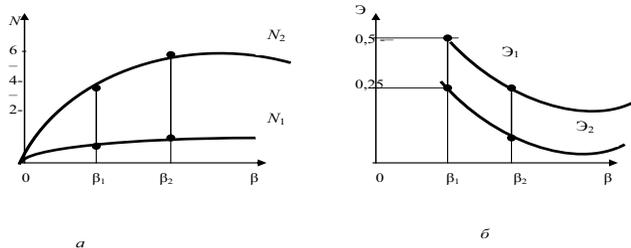


Рис. 6. Иллюстрация существования условий предпочтительности:  
*а* – показатель эффективности – количество продукции; *б* – показатель эффективности  
 степень выполнения задачи  
*N* – количество систем (СТС, СПС); *E* – эффективность выполнения задачи при  
 заданном *N*; *N*, *β* – условные параметры

**Пример 1.2.** Правомочность выбора критерия подобным образом показана в работе [1]. Пусть функция  $\psi[K\{\alpha\}] = \Phi_{\gamma} \cdot K(\alpha) = P_{\gamma} \cdot P_{\text{пол}}$ , где  $\alpha$  – вектор параметров подсистем системы, тогда согласно теории исследования операций из формулы

$$N = \sum_{i=1}^{m_m} \left[ 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \Psi_j) \right]$$

имеем, что  $\partial N / \partial \psi > 0$  и  $\partial \psi / \partial K = 1 > 0$ .

Таким образом, при заданном числе систем (обратная задача) для сравнения альтернативных вариантов следует использовать обобщенный показатель  $K(\alpha) = P_{\gamma} \cdot P_{\text{пол}}$  [1], причем для наилучшего варианта  $K(\alpha)$  должно быть максимальным.

При сравнении вариантов по обобщенным показателям предполагается, что значения других параметров, не включенных в обобщенный показатель, для сравниваемых вариантов одинаковы [32]. Область применения обобщенного показателя определяется следующими условиями (в зависимости от принятого критерия):

$$\text{а) } \frac{W(\{\alpha\}_1, \{\beta\}) - W(\{\alpha\}_2, \{\beta\})}{K(\{\alpha\}_1) - K(\{\alpha\}_2)} < 0, \quad \beta \in [\{\beta\}_n, \{\beta\}_k];$$

$$\text{б) } \frac{W(\{\alpha\}_1, \{\beta\}) - W(\{\alpha\}_2, \{\beta\})}{K(\{\alpha\}_1) - K(\{\alpha\}_2)} > 0, \quad \beta \in [\{\beta\}_n, \{\beta\}_k].$$

Здесь индексы «н» и «к» означают начальное и конечное значения параметра  $\beta$ .

Приведенные условия соответствуют требованию отсутствия пересечения показателей эффективности сравниваемых вариантов по всей области неопределенности.

В более общем случае операция может быть представлена в виде нескольких последовательных этапов, а показатель эффективности – в виде аддитивной или мультипликативной функций соответственно. Для отбраковки вариантов в этом случае необходимо, чтобы выполнялось условия предпочтительности для всех этапов. Невыполнение этого условия по части показателей означает, что необходим анализ эффективности другими методами, например, на основе непосредственного метода сравнения [32]. В этом случае использование обобщенного показателя возможно в определенной области  $[\beta]$ , которую необходимо установить в процессе исследования СТС.

***В заключение следует отметить.***

Преимущества изложенной методологии применения системного анализа очевидны и заключаются в следующем:

- в едином критерии системы ***учитываются все взаимосвязи сложной системы***, критерии и ограничения, позволяющие спроектировать систему, оптимальную в самом широком смысле;
- исследования каждого элемента системы с учетом требований с более высокого уровня иерархии, которые получены из общего критерия системы, позволяют построить набор рациональных вариантов  $i$ -го элемента (подсистемы) СТС, параметры которого выбраны с учетом выполнения конечного критерия системы;
- такой подход позволяет на этапе технической реализации отдельных блоков и узлов системы в случае невозможности их реализации выбрать из полученной матрицы новый рациональный вариант  $i$ -го узла системы, параметры которого также удовлетворяют конечному критерию системы;
- реализация методологии проектирования системы с позиций системного анализа позволяет сократить время создания новых образцов на 20...30% благодаря единому соответствию параметров всех узлов, блоков, модулей и подсистем всей системы, причем могут учитываться экономические вопросы и результаты.

\*\*\*

Приведенные в данной главе общие данные о системном анализе позволяют применять их при исследовании и проектировании различных СТС, в том числе и их составных частей, таких как система управления, информационный блок, исполнительные органы и др. В качестве СТС могут быть рассмотрены перспективные варианты робототехнических систем, платформ и комплексов.

## Глава 2. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

### 2.1. Спектральный метод ранжирования альтернативных вариантов

Существующие методы оценки вариантов систем (метод оценки Парето и др.) не всегда удобны из-за необходимости принятия решения в условиях неопределенности, а также из-за того, что в большинстве случаев рассматриваются Парето-неоптимизируемые системы.

Сталкиваясь с многокритериальными задачами целесообразно преобразовывать их к обычным задачам с одним критерием [1]. Для задач с одним критерием разработаны многочисленные методы исследований и проектирования. Помимо свертывания критериев в один, можно сократить множество исходных вариантов в результате исключения заведомо непригодных. Один из способов сокращения множества вариантов предложен итальянским экономистом В. Парето в 1904 г. [26]. Рассмотрим указанный способ.

Пусть сделан выбор  $x^*$ . Предположим, что существует некоторый другой выбор  $\hat{x}$ , причем такой, что для всех критериев  $f_i(x)$  имеют место неравенства

$$f_i(\hat{x}) \geq f_i(x^*), i = 1, \dots, n,$$

причем хотя бы одно из неравенств – строгое.

Очевидно, что выбор  $\hat{x}$  предпочтительнее  $x^*$ . Поэтому все векторы  $x^*$ , удовлетворяющие данному неравенству, следует сразу исключить из рассмотрения. Далее следует оценивать только те векторы  $x^*$ , для которых не существует  $\hat{x}$ . Необходимо, чтобы для всех критериев удовлетворялось приведенное неравенство. Множество таких значений  $x^*$  называется множеством Парето, а вектор  $x^*$  называется наилучшим вектором результатов (вектором Парето) [26]. Из  $f_i(\hat{x}) \geq f_i(x^*)$  для любого  $i$  следует  $f_i(\hat{x}) = f_i(x^*)$ .

Принцип Парето не выделяет единственного решения, а только сужает множество альтернатив. Окончательный выбор делает ЛПП. В системном анализе одно из центральных мест играют методы отбраковки неконкурентоспособных вариантов и методы последовательного сжатия множества альтернатив. Эта задача тем более сложна, если варианты относятся к Парето-неоптимизируемым системам:

$$f_1(x) \rightarrow \max, f_2(x) \rightarrow \min, f_3(x) \rightarrow \max, f_4(x) \rightarrow \min \text{ и т.п.}$$

Рассмотрим оценку альтернативных вариантов системы, в которой используется спектральный метод сравнения Парето - неоптимизируемых систем [1]. На основе данного подхода разработана методика комплексной оценки системы по иерархической схеме с применением спектрального метода. Фактически предлагается свертка нескольких критериев в один. Общим недостатком методов свертки является субъективизм в выборе весовых коэффициентов. В предлагаемой далее процедуре субъективизм отсутствует потому, что весовые коэффициенты рассчитываются автоматически в зависимости от матрицы показателей. Но в отличие от существующих методов *предлагаемый подход не определяет абсолютное значение показателя эффективности, а дает сравнительную относительную оценку.*

Применение предлагаемой методики возможно только при выполнении следующих условий:

— альтернативные варианты системы представляют собой набор характеристик системы и их подсистем, полученных в результате решения задачи оптимизации (например, по критерию  $P = \max$ ), либо экспертной оценки, либо путем проведения летных испытаний, или полунатурного моделирования системы, либо проведения маркетинговых исследований, либо реализаций продукции;

— рассчитывается относительный показатель облика системы, то есть альтернативные варианты ранжируются относительно друг друга (проводится качественная оценка альтернатив).

Предполагается, что выбор тактико-технических характеристик (ТТХ) системы осуществляется исходя из целевой задачи  $U$ .

Каждый альтернативный вариант можно охарактеризовать множеством частных и обобщенных показателей функционирования системы и множеством проектных  $\{\tau_j\}$  и тактических  $\{\pi_j\}$  параметров СТС и ее подсистем. Выбор элементов данных множеств осуществляется так, чтобы изменение каждого из них в реальных диапазонах приводило к необходимости изменения остальных, причем новый вариант системы при этом должен принадлежать выбранному множеству альтернатив. Такие характеристики в дальнейшем (в соответствии с терминологией [36]) будем называть существенными признаками системы (признак – характеристика и параметр сложной системы (блока, подсистемы)).

При наличии набора существенных признаков системы спектральный метод сравнения позволяет получить ее относительную характеристику в виде комплексного показателя эффективности  $\Xi$ .

Суть подхода заключается в следующем. Пусть каждый альтернативный вариант системы представлен в виде матрицы-строки, элементами которой являются признаки системы. Основным условием при данном представлении является включение в матрицу-строку всех существенных признаков. Включение в матрицу признаков, вариации которых незначительно влияют на общий показатель эффективности системы (т.е. несущественных), не изменяет конечный результат, а алгоритм предусматривает представление таких признаков по окончании решения задачи. Составляется двумерная матрица, строками которой являются указанные признаки альтернатив, а столбцами – качественно одинаковые признаки различных альтернатив. Символом  $\Pi_i$  ( $i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, n$ ) обозначен признак для  $i$ -го альтернативного варианта  $A$  (табл. 5):

Таблица 5. Пример матрицы показателей

		<i>Показатели (характеристики) систем (n показателей)</i>				
		$\Pi_1$	...	$\Pi_k$	...	$\Pi_n$
<i>Варианты сравняемых систем (m систем)</i>	$A_1$	$\Pi_{11}$	...	$\Pi_{1k}$	...	$\Pi_{1n}$
	.		...			
	.					
	$A_l$	$\Pi_{l1}$	...	$\Pi_{lk}$	...	$\Pi_{ln}$
	.		...			
	$A_m$	$\Pi_{m1}$	...	$\Pi_{mk}$	...	$\Pi_{mn}$

Представим множество  $\{\Pi_{ik}\}$  условно как 2 группы признаков: в первую введем признаки, увеличение значений которых ведет к монотонному увеличению общего показателя эффективности  $U$ , во вторую – признаки, увеличение которых ведет к монотонному убыванию  $U$ . Признаки, значения которых оптимизированы на предварительных этапах исследований, также включаются в матрицу.

Проведем нормирование величин  $\Pi$  следующим образом: для признаков *первой группы*:

$$\Pi_{lk}^u = \frac{\Pi_{lk}}{\max_{l=1,m} \{\Pi_{lk}\}}, \quad k = \overline{1, \dots, n}; \quad (2.1)$$

для признаков *второй группы*:

$$\Pi_{lk}^u = \frac{\min_{l=1,m} \{\Pi_{lk}\}}{\Pi_{lk}}. \quad (2.2)$$

Сведя таким образом множество признаков к одинаковому качеству (0 – наихудший, 1 – наилучший; при возрастании  $\Pi_{lk}$  от 0 до 1 – общий показатель эффективности системы возрастает), составим матрицу признаков. Фактически величина 0 означает минимальное значение признака, 1 – максимальное значение. Это равносильно переходу к системе координат, где начало находится в точке, соответствующей минимальному значению функции. На рис. 7 показана одна и та же функция, но в разных координатах по оси ординат: абсолютных на интервале ( $\max$ ,  $\min$ ) и относительных (1, 0).

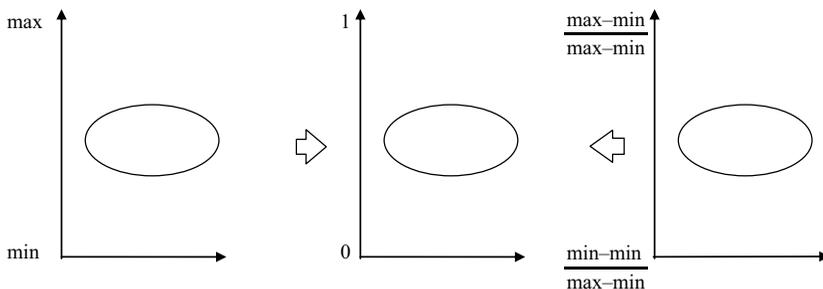


Рис. 7. Выбор интервала качества признаков [0, 1]

Исходя из матрицы  $\Pi$  введем векторы  $\omega = (\omega_1, \dots, \omega_m)^T$  и  $a = (a_1, \dots, a_n)^T$ , а весовые коэффициенты по строкам и столбцам определим с помощью  $T$ -преобразования [36]:

$$\omega^* = T(a); \quad a^* = T(\omega),$$

где  $T(a) = \Pi_{11}a_1 + \dots + \Pi_{1n}a_n;$

$$T(\omega) = \Pi_{1k}\omega_k + \dots + \Pi_{mk}\omega_m;$$

$$a_l = \sum_{k=1}^n \Pi_{lk}; \quad l = \overline{1, \dots, n};$$

$$\omega_k = \sum_{l=1}^m \Pi_{lk}; \quad k = \overline{1, \dots, m}.$$

Проведем нормирование векторов  $\omega$  и  $a$ :  $\omega^0 = \alpha \cdot \omega^*$ ;  $a^0 = \beta \cdot a^*$ , причем

$$\alpha = \frac{1}{\max_{l=1, \dots, m} \{\omega_l^*\}}; \quad \beta = \frac{1}{\max_{k=1, \dots, n} \{a_k^*\}}.$$

В соответствии с теоремой [48] пределами последовательности векторов  $\omega_1^0, \omega_2^0, \dots, \omega_\lambda^0, \dots, a_1^0, a_2^0, \dots, a_\lambda^0, \dots$ , где  $\lambda$  – номер итерации, являются:

$$\omega_\lambda^0 = \omega_{\lambda-1}^0 = \{1, 1, \dots, 1\}^T;$$

$$a_\lambda^0 = a_{\lambda-1}^0 = \{1, 1, \dots, 1\}^T.$$

Отсюда следует критерий расчета показателя ранжирования  $K_p$ :

по строкам 
$$R_{\text{стр}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n |a_k^{(\lambda)} - a_k^{(\lambda-1)}|^2 < \varepsilon;$$

по столбцам 
$$R_{\text{стб}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{l=1}^m |\omega_l^{(\lambda)} - \omega_l^{(\lambda-1)}|^2 < \varepsilon.$$

где  $\varepsilon$  – заданная точность сходимости итерационного процесса.

В соответствии с данным методом алгоритм расчета  $K_p$  Парето-неоптимизируемых систем состоит в следующем:

- для множества альтернативных вариантов  $A_l$  ( $l = 1, \dots, m$ ) и выбранного перечня существенных признаков  $P_k$  ( $k=1, \dots, n$ ) составляется матрица  $\Pi$  абсолютных величин признаков  $\Pi_{lk}$ ;
- согласно правилу нормирования (формулы 2.1 и 2.2) матрица  $\Pi$  сводится к матрице  $\Pi_{\Pi}$ ;
- задается точность сходимости итерационного процесса  $\varepsilon$ ;
- по приведенным выше формулам рассчитываются значения  $\omega^0$  и  $a^0$ , причем результаты выводятся на ПЭВМ в виде таблиц по вариантам и признакам.

Расчет показателя  $K_p$  проводится в динамике в зависимости от числа характеристик  $i = 2, 3, \dots, m$  (где  $m$  – выбранное число признаков):

- проводится анализ полученных результатов и ранжирования альтернативных вариантов по предпочтительности, а признаков – по существенности, т.е. по степени влияния на конечный результат выполнения задачи;
- первые  $n_v$  вариантов выбираются в качестве приоритетных для дальнейшего анализа, причем  $n_v$  определяется исходя из неформализуемых в настоящее время критериев, определяемых схемой функционирования системы, наличием научно-технического задела, производственных мощностей и т.д.;

— в случае попадания в  $n_v$  традиционных системах даются рекомендации о дальнейших путях развития данных систем.

Для определения места традиционных систем во множестве альтернативных вариантов формируется таблица основных характеристик элементов и их подсистем с учетом прогноза улучшения характеристик как систем, так и параметров подсистем.

Возможно ранжирование вариантов двух типов:

- определение наиболее простой системы по срокам ее технической реализуемости;
- определение наиболее перспективного варианта, исходя из закладываемых в расчет прогнозных значений параметров и характеристик подсистем.

В табл. 6 приведены критерии нормирования признаков матрицы П для выбранных условно (в качестве критериев технического облика) следующих признаков: габаритные размеры продукции, критический параметр системы, вероятность выполнения задачи, стоимость разработки (себестоимость продукции), стоимость.

Программа для ЭВМ позволяет выводить на печать матрицы результатов: результатов ранжирования признаков матрицы П для определения качественного вклада  $i$ -й характеристики в общую эффективность системы (табл. 7), а также результаты расчетов  $K_p$  в зависимости от различного числа признаков матрицы П (табл. 8).

Представление результатов в таком виде позволяет оценить динамику изменения показателя  $K_p$  при увеличении числа признаков от 2 до  $n$ , а также выбрать те признаки, которые вносят наибольший вклад в систему.

Примеры ранжирования альтернативных вариантов приведены в [1–9].

Таблица 6. Критерии нормирования признаков матрицы П

Признак	Ранжирование признаков по критерию	
	технической реализуемости	перспективности варианта
Габаритные размеры	max	min
Критический параметр системы	min	max
Вероятность выполнения задачи	- "-	- "-
Стоимость разработки	- "-	min
Цена	max	max
Другие параметры		

**Таблица 7. Вклады параметров в суммарную эффективность системы  
(нагрузки по столбцам)**

Число признаков	Номер признака				
	1	2	3	4	...
2	xx	xx			
3	xx	xx	xx		
4	xx	xx	xx	xx	
...	...				

**Таблица 8. Результаты ранжирования (нагрузки по строкам)**

Число признаков	Номер варианта					
	1	2	3	4	5	...
2	xx	xx	xx	xx	xx	
3	xx	xx	xx	xx	xx	
4	xx	xx	xx	xx	xx	
...	...					

Таким образом, при расчете методом спектрального ранжирования альтернативных вариантов формируются данные табл. 8, из анализа которой ясно, какой вариант наиболее предпочтителен для дальнейшей разработки или применения. Результаты в таблице показывают динамику распределения номеров вариантов в зависимости от добавляемого варианта. Приведенные в табл. 7 данные показывают, какой именно параметр оказывает наибольшее влияние на выбор лучшего варианта. При добавлении каждого нового параметра меняется вклад всех параметров, так как расчет ведется в относительных величинах друг относительно друга – как вариантов, так и параметров. На рис. 8 показан пример ранжирования, из которого ясно, что лучший вариант – первый; второй и третий – примерно одинаковы.

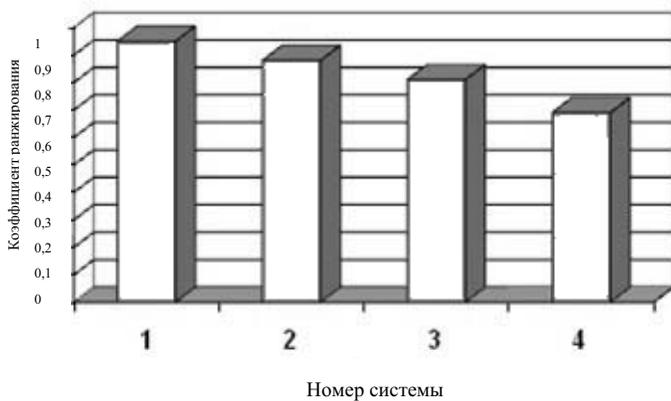


Рис. 8. Пример ранжирования альтернативных вариантов

На рис. 9 приведена блок-схема расчета показателя ранжирования альтернативных вариантов  $K_p$  и вкладов параметров  $B_{вкл}$  в общую эффективность системы. На рис. 10 приведена блок-схема программы ранжирования альтернативных вариантов на языке C++. Программа зарегистрирована в Роспатенте РФ [25].

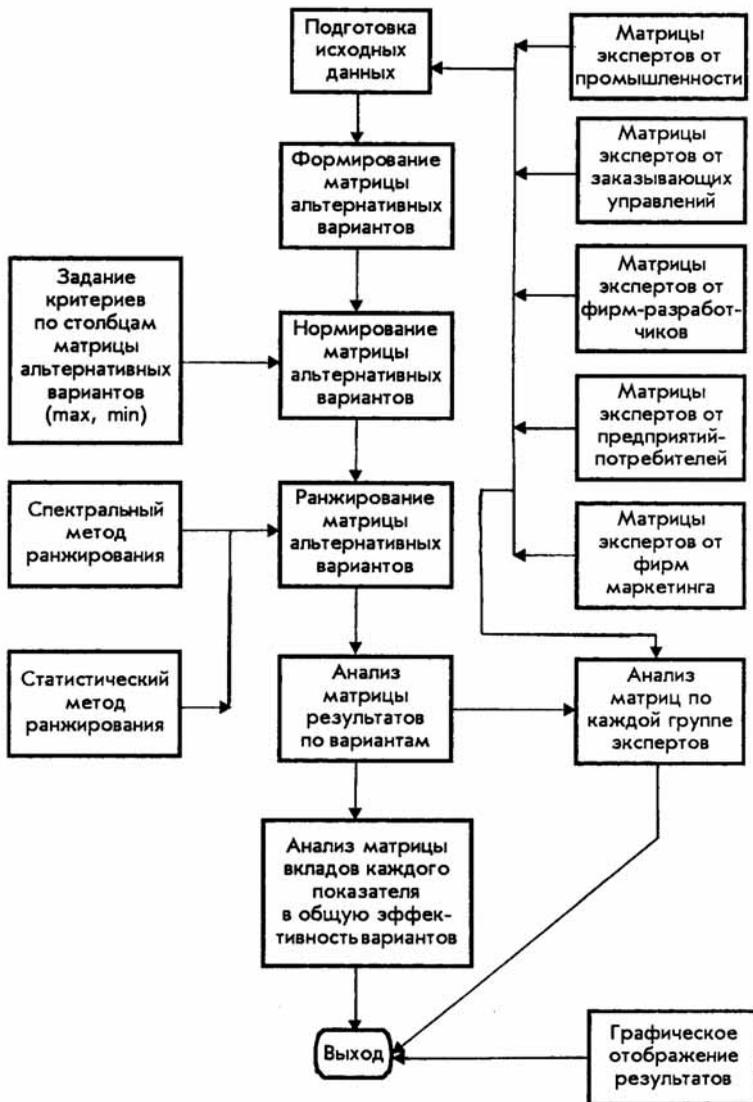


Рис. 9. Блок-схема расчетов показателя  $K_p$  и вкладов показателей  $V_{вкл}$  в общую эффективность системы

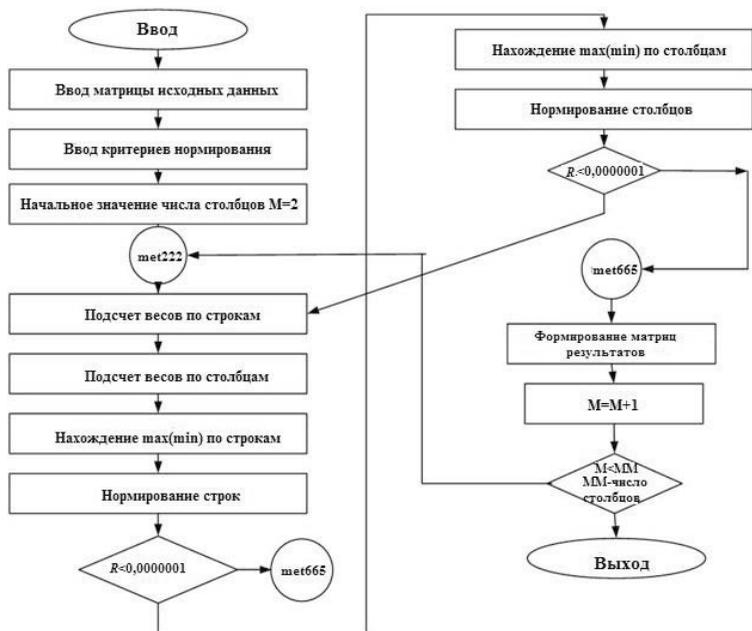


Рис. 10. Блок-схема программы ранжирования альтернативных вариантов на C++

## 2.2. Отбраковка параметров сложных систем с помощью спектрального метода

При произвольной форме матрицы  $\Pi$  необходимо предварительно провести нормирование ее элементов по графам согласно уравнениям (2.1) и (2.2).

Процесс нормирования матрицы состоит в следующем. Если ее показатель имеет критерий  $\min$ , это означает, что для наиболее эффективной системы этот показатель должен быть минимальным. При нормировании выбирается минимальный элемент и затем находят отношение величины этого элемента к каждому элементу столбца матрицы. Если показатель матрицы имеет критерий  $\max$ , это означает, что для наиболее эффективной системы этот показатель должен быть максимальным. При нормировании выбирается максимальный элемент и определяется частное между всеми элементами рассматриваемо-

го столбца матрицы и этим элементом. Полученная матрица называется нормированной и пример сравниваемых систем.

Таблица 9. **Пример матрицы вариантов систем**

	Масса, т	Стоимость, млн руб	Энергопотребление, МВт
Система 1	45	120	455
Система 2	33	25	235
Система 3	25	45	652
Система 4	69	63	823
<b>Критерии</b>	<b>min</b>	<b>max</b>	<b>min</b>

В связи с тем, что первый столбец матрицы (масса) нормируется по критерию min – выбирается минимальное число, равное 25. Графа после нормирования будет иметь вид 25/45; 25/33; 25/25; 25/69, или окончательно 0,55; 0,7575; 1,0; 0,362 (табл. 10).

Вторая графа нормируется по максимуму. В этом случае все элементы графы делятся на ее максимальное число, равное 120. В результате получим: 120/120; 25/120; 45/120; 63/120, или окончательно имеем 1,0; 0,208; 0,375; 0,525.

Окончательно нормированная матрица будет иметь следующий вид (табл. 10).

Таблица 10. **Нормированная матрица**

0,55	1,0	0,516
0,7575	0,208	1,0
1,0	0,375	0,360
0,362	0,525	0,285

Результаты ранжирования таковы (при 4-х вариантах системы, каждая из которых имеет по 3 параметра):

Показатель ранжирования $K_p$	0,998	1,000	0,908	0,572
Вклад параметров $V_{вкл}$	1,000	0,763	0,828	

Первая строка показывает, что наилучшая система – вторая (показатель  $K_p = 1$ ), далее идет первая система с  $K_p = 0,998$  и т.п.

Вторая строка показывает вклад параметров в эффективность. Наибольший вклад вносит первая характеристика – масса. Графические результаты ранжирования представлены на рис. 11.

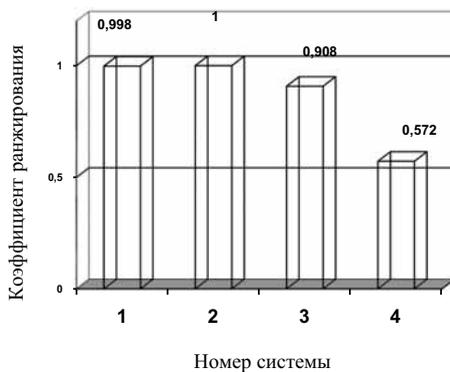


Рис. 11. Результаты ранжирования

**Пример 2.1.** Пусть матрица Парето-оптимизируемой системы имеет значения, приведенные в табл. 11.

Таблица 11. Пример матрицы параметров

	Масса, т	Стоимость, млн руб	Габариты, м
Система 1	<b>20</b>	<b>1,5</b>	<b>2×2×2</b>
Система 2	30	2,0	3×3×3
Система 3	40	3,0	5×5×5
<b>Критерий</b>	<b>min</b>	<b>min</b>	<b>min</b>

Так как критерии для всех параметров одинаковы (min), то лучшая система определяется по наименьшим величинам параметров. В нашем случае наилучшей системой является система 1.

**Пример 2.2.** В табл. 12 приведен пример, из которого видно, что критерии параметров различны (min, max), то есть это Парето-неоптимизируемая система.

Таблица 12. Пример матрицы

	Масса, т	Стоимость, млн. Руб.	Габариты, м	Надежность
Система 1	20	1,5	2×2×2	0,8
Система 2	30	2,0	3×3×3	0,9
<b>Система 3</b>	<b>40</b>	<b>3,0</b>	<b>5×5×5</b>	<b>0,85</b>
<b>Критерий</b>	<b>max</b>	<b>min</b>	<b>max</b>	<b>max</b>

В данном случае определить лучшую систему сложно. Для этого необходимо свернуть все критерии в единый, одинаковый для всех систем.

Приведенный выше спектральный метод представляет собой один из способов свертывания множества критериев в единый. На основании оценки его значения принимается решение о лучшем варианте сравниваемых систем.

Результаты расчетов имеют вид

Показатель ранжирования $K_p$	0,796	0,871	1,0	
Вклад параметров $V_{вкл}$	0,812	0,772	0,491	1,0

Сравнение результатов расчетов, приведенных в табл. 11 и табл. 12, показывает, что выбор критериев для нормирования параметров весьма существен с точки зрения эффективности системы.

Важно четко представлять, как влияет каждый параметр на эффективность системы. Если это невозможно сделать, предлагается провести серию расчетов при различных критериях нормирования и из анализа полученных результатов сделать вывод о наиболее приемлемом критерии для каждого параметра системы.

Для приведенных в табл. 12 данных лучшим вариантом является 3-й, при этом наибольший вклад вносят первая и четвертая характеристики.

### 2.3. Сравнение спектрального метода с другими методами

Для подтверждения работоспособности спектрального метода ранжирования проведем сравнение метода с другими методами. В табл.13 приведена матрица исходных данных для трех систем. На рис. 12 приведены результаты ранжирования матрицы из табл.13. Анализ рис. 12 а показывает, что наилучшим вариантом является вторая система ( $K_p = 1$ ), первая и третья системы имеют коэффициент ранжирования  $K_p = 0,707$ .

Таблица 13. Матрица исходных данных

	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$\Pi_3$	$\Pi_4$
Система 1	1	1	0	0
Система 2	0	1	1	0
Система 3	0	0	1	1

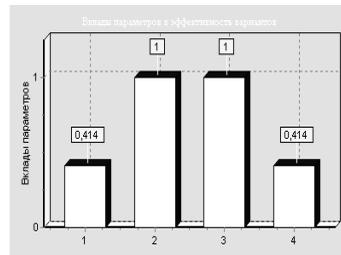
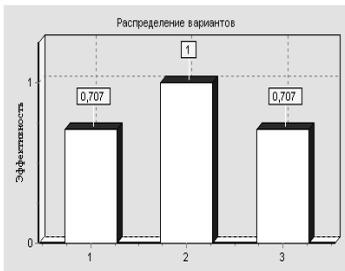


Рис. 12. Результаты ранжирования матрицы исходных данных, приведенной в табл. 13, с помощью спектрального метода ранжирования

Из рис. 12 б следует, что наибольший вклад в выбор наилучшей системы внесли характеристики 2 и 3; параметры 1 и 4, имеющие величину вклада  $W_{\text{вкл}} = 0,414$  более чем в два раза меньше повлияли на процесс ранжирования.

Таблица 14. Критерии выбора рационального варианта

Метод	Формула	Пояснение
Максиминный критерий Вальда, или критерий осторожного наблюдателя	$W = \max_{\mu} \min_{\vartheta} W_{\mu\vartheta}$	Гарантирует определенный выигрыш при наихудших условиях
Критерий минимаксного риска. Критерий Сэвиджа	$S = \min_{\mu} \max_{\vartheta} r_{\mu\vartheta}$	Минимизирует потери эффективности при наихудших условиях
Критерий пессимизма-оптимизма, или критерий Гурвица		Взвешиваются наихудшие и наилучшие условия
а). по эффективности	$\Gamma = \max_{\mu} \left[ \gamma \min_{\vartheta} W_{\mu\vartheta} + (1-\gamma) \max_{\vartheta} W_{\mu\vartheta} \right]$	
б). по потерям эффективности (риска)	$\Gamma = \min_{\mu} \left[ \gamma \max_{\vartheta} r_{\mu\vartheta} + (1-\gamma) \min_{\vartheta} r_{\mu\vartheta} \right]$	
Критерий Лапласа (все варианты равновероятны)	$L = \max_{\mu} \frac{1}{\chi} \sum_{\vartheta=1}^{\chi} W_{\mu\vartheta}$	

В табл. 14 Приведены наиболее известные критерии, которые могут использоваться для выбора рационального варианта, в случае, когда условия не определены, но являются пассивными [32].

В табл. 15 и на рис. 13 приведены результаты применения критерия Сэвиджа к матрице, приведенной в табл. 13. Анализ результатов показывает, что наименьшие потери обеспечиваются для второго варианта (в табл.15 это величина 0,1), что согласуется с результатами спектрального метода.

Таблица 15. Сравнение с критерием Сэвиджа (риск)  
Матрица рисков (тот же пример)

Вариант	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$\Pi_3$	
$a_1$	0,4	0,2	0	0,4
$a_2$	0	0,1	0,1	<b>0,1</b>
$a_3$	0,3	0	0,2	0,3

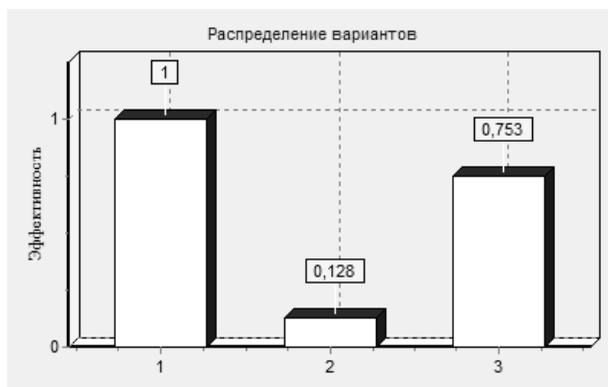


Рис. 13. Результаты применения критерия Сэвиджа

В табл. 16 и на рис. 14 приведены результаты применения критерия Вальда к матрице исходных данных, приведенных в табл. 13. Анализ результатов показывает, что наилучшим вариантом является второй (в табл. 16 это величина 0,7), что согласуется с результатами спектрального метода ранжирования.

Аналогично можно применить критерии Гурвица и Лапласа (см. табл. 14) к выбору рационального варианта матрицы табл. 13. Полученные результаты показывают, что спектральный метод ранжирования альтернативных вариантов позволяет гарантировано оце-

нивать матрицы вариантов (систем), а также вычислять величины вкладов каждого параметра в конечную эффективность вариантов (систем).

Таблица 16. Сравнение с методом Вальда

Вариант	П <sub>1</sub>	П <sub>2</sub>	П <sub>3</sub>	
$a_1$	0,5	0,6	0,9	0,5
$a_2$	0,9	0,7	0,8	<b>0,7</b>
$a_3$	0,6	0,8	0,7	0,6

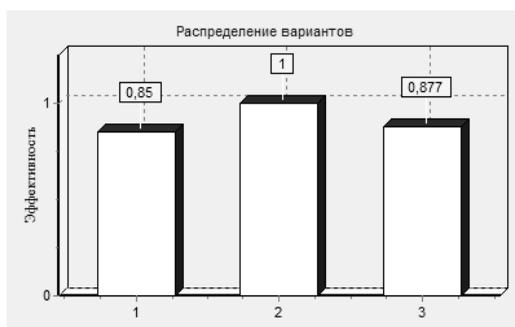


Рис. 14. Применение критерия Вальда

Поясним методику применения метода ранжирования альтернативных вариантов на некоторых примерах.

**Пример 2.3.** Оценка вариантов ПЭВМ

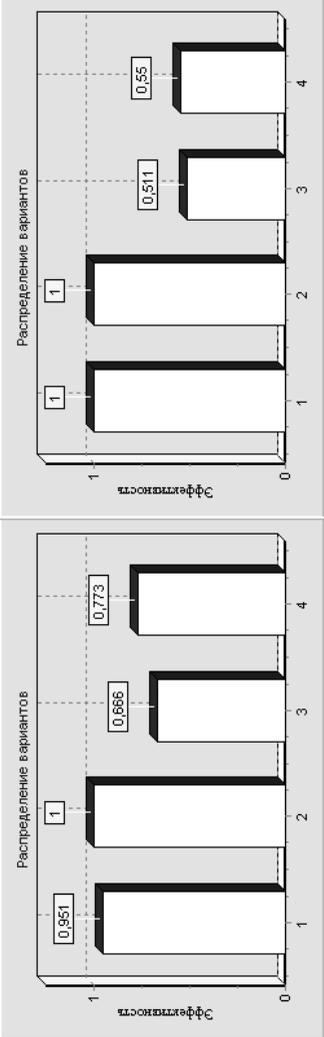
В табл. 17 приведены технические характеристики 4-х типов ПЭВМ. На рис. 15 и 16 приведены результаты ранжирования матрицы параметров, приведенных в табл. 17, соответственно по 3-м и по 6-ти параметрам. На рис. 15,а и 16,а приведены результаты ранжирования, на рис. 15,б и 16,б – вклады параметров в общую эффективность систем.

Таблица 17. Характеристики ПЭВМ

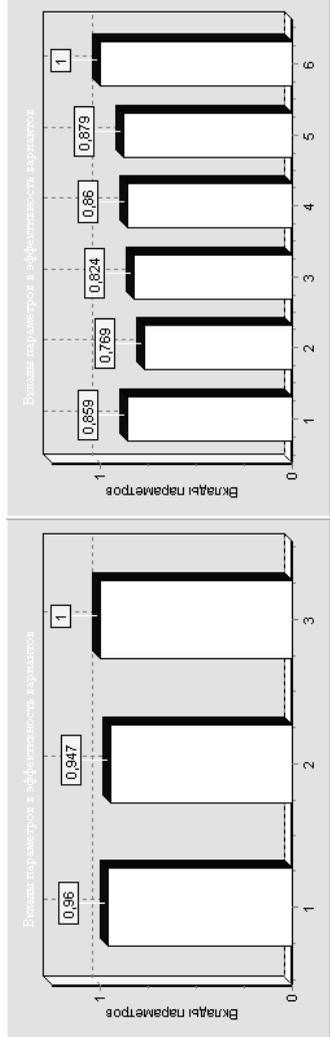
ПЭВМ	Процессор частота	Емкость ОЗУ, Мб	HDD, Гб	Стоимость, руб	Масса, кг	Диагональ экрана, "
Sony VAIO Fit 15A	Intel Core i7 4500U (1800 МГц)	16384	1000	67 300	2,300	15
Dell Inspiron 7737	Intel Core i7 (1800 МГц)	16384	1000	41 300	3,300	17,3
MSI GT663	Intel Core i7 (1600 МГц)	4096	500	70 000	3,500	15,6
Apple MacBook Pro 13	Intel Core 2 Duo (2530 МГц)	4096	250	52 465	2,060	13

Анализ результатов показывает, что наилучшим вариантом является второй - Dell Inspiron 7737, затем следует первый - SONY VAIO Fot 15A, третий и четвертый варианты уступают примерно вдвое.

Следует обратить внимание на то, что вклады параметров примерно близки к 1. Это означает, что параметры выбраны обосновано и вносят существенный вклад в процесс ранжирования вариантов. Как уже отмечалось, что если вклады параметров меньше величины 0,3-0,4, то ими можно пренебречь из-за их невысокого вклада в конечную эффективность вариантов.



а



б

Рис. 15. Результаты ранжирования по 3-м показателям

Рис. 16. Результаты ранжирования по 6-ти показателям

**Пример 2.4.** Применение спектрального метода при ранжировании матриц оценок, подготовленных экспертами.

Для формализации экспертной оценки проводится выбор экспертов, удовлетворяющих следующим требованиям:

- экспертами должны быть ведущие специалисты в рассматриваемой области;
- в группу экспертов желательно ввести представителей: Заказчика, промышленности, РАН, высшей школы, маркетинговых служб и др.;
- экспертам для анализа представляются перечень предложений, техническое описание, технико-экономическое обоснование, потребные ресурсы для реализации (финансовые, оборудование, кадры, помещения, сертификация);
- эксперты заполняют бланк экспертизы. По предложениям экспертов состав показателей может уточняться и дополняться;
- результаты ранжирования обсуждаются с экспертами и, в случае несогласия, принимается решение либо о корректировке формулировок показателей, либо о дополнении или изменении состава показателей;
- результаты ранжирования передаются ЛПП (лицу, принимающему решение) для анализа и выбора окончательных выводов.

Результаты ранжирования являются относительными величинами и служат вспомогательными материалами при принятии обоснованных решений.

Вариант перечня показателей приведен в табл. 18, а бланк для заполнения экспертом – в табл.19.

На рис.17 и в табл. 20 приведены результаты экспертизы.

**Таблица 18. Состав показателей**

№ п/п	Показатель	Назначение показателя	Оценка показателя
1	Обеспечение выполнения заданной задачи	Актуальность с точки зрения обеспечения выполнения задачи	Баллы, 1-10
2	Перспективы практического использования результатов направления работ	1. Сохранение или создание своей ниши на отечественных (мировых) рынках наукоемких товаров и услуг 2. Актуальность с точки зрения экономического прогресса	Да - нет (1 - 0)  Да - нет (1 - 0)
3	Уровень направления работ по отношению к лучшим мировым аналогам	Выше	1
		Соответствует	0,5
		Ниже	0
4	Стадия разработки с точки зрения достижения практических результатов	Поисковые исследования	0,3
		НИР	0,5
		ОКР	0,7
		Внедрение и практическое использование	0,9
		Продажа	1,0
5	Ожидаемый срок реализации	До 2020 г.	1
		2020-2025 г.г.	0,6
		2025-2030 г.г.	0,4

**Таблица 19. Бланк экспертизы, заполненный двумя экспертами**

№ п/п	Проблемное направление	Величины показателей, выставленные экспертами						
		№ эксперта	п. 1	п. 2.1	п.2.2	п. 3	п.4	п.5
1	Разработка нейрокомпьютеров	1	7	0	0	0,5	0,3	0,4
		2	8	1	1	0	0,5	0,8
		3						
2	Разработка биоподобных микророботов	1	4	0	0	0,5	0,3	0,4
		2	5	1	1	0	0,5	0,7
		3						
3	Создание отдельных моделей микророботов на основе достижений бионики	1	2	0	0	0	0,3	0,8
		2	10	1	1	0,5	0,5	0,8
		3						
4	Создание разработки и производства мобильного командного пункта управления операцией	1	7	1	1	0,5	0,5	0,8
		2	10	1	1	0,5	0,5	0,8
		3						
5	Развертывание работ по биотелеметрии	1	2	0	0	0	0,3	0,4
		2	10	1	1	0,5	0,5	0,8
		3						
6	Создание производства мимикрирующих материалов	1	10	1	1	1	0,3	0,8
		2	10	1	1	1	0,5	0,8
		3						

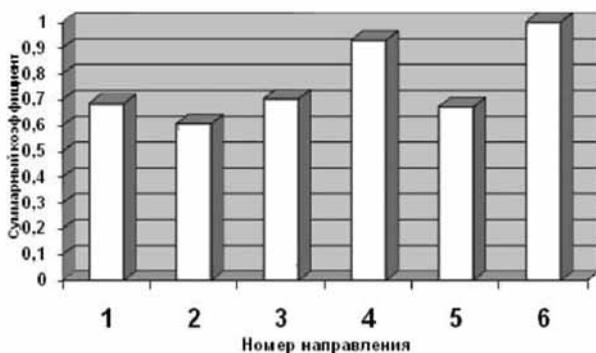


Рис. 17. Результаты ранжирования вариантов

Таблица 20. Суммарные показатели ранжирования вариантов

Число показателей	Номер направления					
	1	2	3	4	5	6
2	0,685	0,607	0,703	0,93	0,672	1,0

Из анализа табл. 20 следует, что по результатам обработки наиболее приоритетным является направление 6, затем направление 4. Остальные направления имеют коэффициент ранжирования в интервале 0,6 - 0,7 и принятие решения по этим направлениям должно определяться ЛПП в зависимости от целей, поставленных перед ним.

**Пример 2.5.** Пример оценки технических обликов обитаемых аппаратов. Пусть обитаемые подводные аппараты имеет характеристики, приведенные в табл.21.

Результаты нормирования матрицы приведены в табл.22. Результаты ранжирования приведены на рис.18 и 19.

Из рис.18 видно, что наилучшим вариантом аппарата по приведенным исходным данным является вариант 4 – аппарат «Риф». Наибольший вклад внесли такие характеристики как «скорость хода» и «водоизмещение» (рис. 19).

Таблица 21. Характеристики подводных обитаемых аппаратов

№ п/п	Название	Скорость хода, уз.	Рабочая глубина погружения, м	Запас жизнеобеспечения, чел/час	Водоизмещение, т
1	«Алвин», США	0,5	4500	3 / 72	17,0
2	«ОСА-3-600», СССР	3,0	600	3 / 8	13,0
3	«Катран», СССР	3,0	300	2 / 8	5,0
4	«Риф», СССР	2,6	100	2 / 6	2,8
5	«Омар», СССР	2,1	600	3 / 8	9,5
6	«Аргус», СССР	1,5	600	3 / 216	8,3
	Критерий	max	max	max	min

Таблица 22. Результаты нормирования матрицы

0,166	1,000	0,330	0,165
1,000	0,133	0,037	0,215
1,000	0,066	0,024	0,560
0,866	0,022	0,018	1,000
0,700	0,133	0,037	0,295
0,500	0,133	1,000	0,337



Рис. 18. Результаты оценки распределения вариантов обитаемых подводных аппаратов

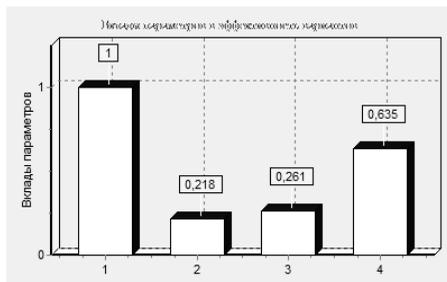


Рис. 19. Вклад технических характеристик в эффективность подводного аппарата

Если в табл.22 изменить критерии оценки и для первого параметра «Скорость хода» поставить «min», то результаты изменятся (рис.20) и наилучшим вариантом станет вариант 1 – «Алвин», США. Таким образом, спектральный метод позволяет оценить влияние каждого параметра на конечную эффективность систем (рис.21). Вклад параметров остался тем же – на первом месте «Скорость хода», на втором – «Водоизмещение».

Анализируя исходную матрицу данных видно, что действительно, если не ставить скорость хода на первое место, то аппарат «Алвин» действительно лучший по 2-м параметрам. Следует иметь в виду, что второй параметр у этого аппарата значительно превосходит другие аппараты, поэтому он является доминирующим (или при другом критерии – наименее существенным). Иногда для лучшего понимания рекомендуется такие параметры при сравнении вариантов удалять.



Рис. 20. Результаты оценки распределения вариантов обитаемых ПА при другом задании критериев

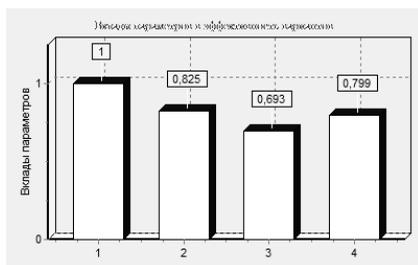


Рис. 21. Вклад технических характеристик в эффективность подводного аппарата при другом задании критериев

**Пример 2.6.** Пусть результаты экспертной оценки двух фирм (А и В) выглядят так, как показано в табл. 23.

Визуальный анализ табл. 23 показывает, что фирма А имеет лучшие показатели по широте и глубине ассортимента, качеству дополнительных услуг и по другим показателям, однако вывод о том, что фирма А превосходит фирму В, будет не совсем правильным. Фирма В имеет потенциальные возможности по выпуску конкурентной продукции.

В табл. 24 представлены результаты ранжирования исходных данных по фирмам А и В с учетом приведенных выше критериев.

В табл. 25 и 26 приведены результаты расчетов на основе спектрального подхода. В частности, в табл. 25 даны значения коэффициента конкурентоспособности для фирм А и В, рассчитанные в динамике на основе учета двух показателей, затем трех, четырех и так до десяти. В табл. 26 представлен вклад каждого показателя в величину коэффициента.

Из анализа табл. 25 следует, что по девяти показателям фирма А имеет показатель конкурентоспособности, равный 1, а фирма В — 0,918 ... 0,992, т. е. фирма В не намного отстает от фирмы А. Таким образом, для достижения цели фирме В необходимо улучшить отдельные показатели но учитывая, что фирма обладает достаточным наличием финансов (см. показатель 10), ей это будет проще, чем фирме А.

Действительно, уже по десяти показателям коэффициент конкурентоспособности фирмы В равен 1, а фирмы А — 0,936.

Приведенный пример показывает широкие возможности предлагаемого подхода к маркетинговым исследованиям. В частности, можно определить нижние границы показателей 1—10, при которых фирма теряет свои позиции на рынке, и, соответственно, принимать обоснованные решения (см. рис. 22).

В случае необходимости оценки риска продаж к перечисленным показателям требуется добавить несколько групп показателей, характеризующих: емкость рынка (I), географию (II), социально-политические факторы (III) (страны, в которую предполагается поставлять товар), физико-технологические (IV), экологические (V) и др.

Таблица 23. Экспертная оценка показателей

Показатель, критерий	Фирма А	Фирма В
1 – max	7	3
2 – max	3	5
3 – max	6	4
4 – min	6	5
5 – max	4	5
6 – min	8	6
7 – max	9	4
8 – max	7	9
9 – max	3	7
10 – max	3	9

Таблица 24. Результаты нормирования

А	В
1,0	0,43
0,6	1,0
1,0	0,67
0,83	1,0
0,8	1,0
1,0	0,75
1,0	0,44
0,78	1,0
0,43	1,0
0,33	1,0

Таблица 25. Результаты ранжирования в динамике

Число учитываемых параметров при ранжировании	Результаты ранжирования для фирмы А	Результаты ранжирования для фирмы В
2	1,0	0,918
3	1,0	0,809
4	1,0	0,921
5	1,0	0,992
6	1,0	0,941
7	1,0	0,867
8	1,0	0,918
9	1,0	0,992
10	0,935	1,0

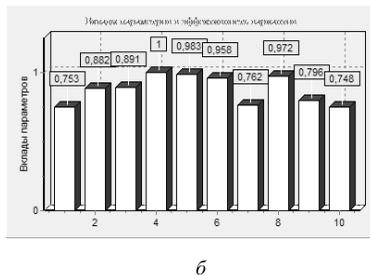
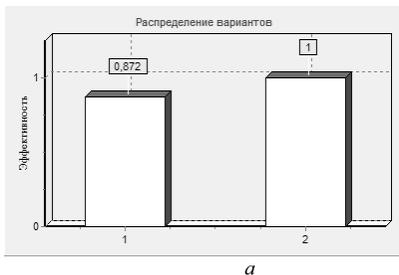


Рис. 22. Результаты ранжирования  
 а – ранжирование фирм; б – вклад параметров в эффективность

Таблица 26. Вклады показателей в эффективность фирм А и В (в динамике)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	0,918	1,0								
3	0,873	0,914	1,0							
4	0,797	0,869	0,924	1,0						
5	0,782	0,874	0,914	1,0	0,984					
6	0,792	0,870	0,921	1,0	0,983	0,963				
7	0,808	0,864	0,932	1,0	0,982	0,972	0,816			
8	0,797	0,868	0,924	1,0	0,983	0,966	0,805	0,971		
9	0,782	0,874	0,914	1,0	0,984	0,957	0,791	0,973	0,780	
10	0,768	0,879	0,904	1,0	0,984	0,949	0,777	0,974	0,789	0,738

## 2.4. Сравнение выборки случайных величин с законами распределения

При исследовании систем различной структуры и сложности построения не всегда удается записать аналитические выражения или сформировать зависимости для описания системных связей. В этом случае можно провести экспериментальные исследования системы и получить выборку результатов функционирования системы. Эта выборка может быть использована для построения закона распределения выходной величины, при этом возможны 2 варианта:

- сравнение полученной выборки со стандартными законами распределения (нормальным, равномерным, экспоненциальным и т.п. – см. приложение А) по критериям согласия Пирсона или Колмогорова и подбор наиболее согласующегося закона;

– при невозможности подобрать стандартный закон формирования теоретического закона (функции) распределения, например, рядом Эджворта [49], основанного на разложении нормального закона распределения случайных величин.

Рассмотрим первый вариант.

### **Проверка гипотез о законе распределения**

#### **а) Критерий Пирсона**

Применение критерия Пирсона основано на факте, что величина имеет распределение с  $f = k - 3$  степенями свободы, где  $k$  – количество интервалов разбиения, полученных при условии, что каждый интервал содержит не менее 10 точек;  $n_i$  – количество наблюдений, попавших в  $i$ -й интервал;  $p_i$  – теоретическая вероятность попадания в  $i$ -й интервал в соответствии с законом распределения.

Расчет величины проводится по следующей схеме:

1. Составляется ряд из координат границ интервалов  $c_1, c_2, \dots, c_{k+1}$  и ряд частот попадания в эти интервалы  $n_1, n_2, \dots, n_{k+1}$ , где  $k$  – количество интервалов.

2. Для границ интервалов  $c_1, c_2, \dots, c_{k+1}$  вычисляются нормированные значения

$$Z_i = (c_i - M_x) / S_x.$$

3. Рассчитываются теоретические вероятности попадания в интервалы.

4. Вычисляется величина

$$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^k \frac{n_i - np_i}{np_i}$$

и количество степеней свободы

$$f = k - 3.$$

Зная значения  $f$  и  $\chi_0^2$  по таблице вероятностей [50] (см. приложение Б) для критерия Пирсона находят вероятность того, что случайная величина, имеющая распределение  $\chi^2$ , примет значение не меньше  $\chi_0^2$ .

Пусть найденная вероятность равна  $\beta = P(\chi^2 \geq \chi_0^2)$ .

Если  $\beta \geq 0,01$ , то можно считать расхождение между проверяемым и стандартным распределениями случайным и гипотезу не противоречащей опытным данным.

При  $\beta < 0,01$  гипотезу отвергают.

Для применения критерия Пирсона в общем случае необходимо, чтобы объем выборки  $n$  и численность разрядов  $m$  были достаточно велики (практически считается достаточным, чтобы было  $n \geq 50 - 60$ ,  $m \geq 5 - 8$ ).

б) *Расчет критерия Колмогорова*

1. Весь диапазон варьирования упорядоченной случайной величины разбивается на  $k$  равных интервалов и определяется количество точек, попавших в каждый интервал  $n_1, n_2, \dots, n_k$ .

2. Строится эмпирическая функция распределения в виде ряда накопленных частот:

$$\frac{n_1}{n}, \frac{n_1 + n_2}{n}, \dots, \frac{\sum_{i=1}^n n_i}{n} = 1.$$

3. Для координат границ интервалов определяются нормированные значения

$$Z_1 = \frac{C_1 - M_x}{S_x}; \quad Z_2 = \frac{C_2 - M_x}{S_x}; \quad \dots, \quad Z_k = \frac{C_k - M_x}{S_x},$$

где  $M_x$  – среднее арифметическое значение;  $S_x$  – среднее квадратическое отклонение.

4. Вычисляются значения функции нормированного теоретического распределения  $F(Z_1), F(Z_2), \dots, F(Z_k)$ .

5. Рассчитывается

$$\lambda_0 = \max_{i=1,2,\dots,k} |F_n(Z_i) - F(Z_i)|.$$

По таблице приложения Б определяется соответствующая вероятность  $P(\lambda \geq \lambda_0)$ .

Если  $P \geq 0,2$  – проверяемая гипотеза принимается, в противном случае – бракуется.

Проверяя заданную выборку случайной величины  $X$  по величинам критериев Пирсона и Колмогорова, определяется наиболее подходящий закон распределения.

В случае, если ни один из приведенных пяти законов распределения не подходит, на основе рассчитанных характеристик выборки рассчитывается теоретический закон распределения данной случайной величины.

**Пример 2.7.** В табл. 27 приведена выборка результатов экспериментальной системы, объемом 100 чисел.

В результате расчетов с помощью программы [24] получено, что для данной выборки математическое ожидание равно  $M_x = 0,492$ ; среднее квадратическое отклонение равно  $S_x = 0,384$ . Из всех законов наиболее подходит экспоненциальное распределение, т.к. по критерию Колмогорова:  $\lambda = 0,394$  и соответственно вероятность принятия гипотезы о экспоненциальном распределении  $P(\lambda) = 0,9972$  (см. табл. Б.2 приложения Б). Выбранный закон согласуется с гистограммой выборки, приведенной на рис. 23.

Таблица 27. Выборка данных при исследовании работоспособности технологической линии по уничтожению боеприпасов

0,01	0,04	0,08	0,09	0,07	0,095	0,098	0,089	0,085	0,099
0,098	0,079	0,069	0,065	0,067	0,099	0,11	0,12	0,15	0,16
0,17	0,18	0,19	0,195	0,199	0,198	0,197	0,194	0,198	0,185
0,165	0,21	0,25	0,25	0,25	0,28	0,29	0,27	0,275	0,276
0,299	0,298	0,297	0,32	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,399
0,398	0,31	0,34	0,42	0,45	0,46	0,49	0,48	0,499	0,498
0,43	0,51	0,52	0,54	0,55	0,56	0,58	0,59	0,62	0,64
0,65	0,67	0,68	0,69	0,75	0,78	0,79	0,78	0,77	0,74
0,82	0,85	0,86	0,87	0,89	0,95	0,96	0,99	0,98	1,05
1,07	1,09	1,15	1,18	1,25	1,29	1,35	1,48	1,57	1,7

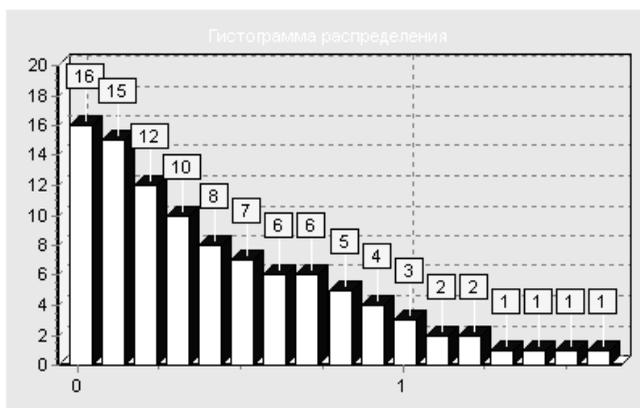


Рис. 23. Гистограмма распределения, построенная на основе данных выборки (табл. 27)

### 2.5. Теоретический закон распределения величин

На основе статистического моделирования всей схемы функционирования системы или отдельных ее подсистем формируется матрица случайных величин  $A = \{a_{ij}\}$ .

Для случая, когда ни одно стандартное распределение не удовлетворяет критериям согласия Пирсона ( $\chi^2$ ) или Колмогорова, формируется теоретический закон, основанный на разложении функции Лапласа в бесконечный ряд Эджворта [49]:

$$f(x) = 1/\sigma [\Phi(z) - A_s/3! \Phi^{(4)}(z) + \varepsilon/4! \Phi^{(5)}(z) + 10 A_s^2/5! \Phi^{(6)}(z)],$$

где  $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^z \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad z = \frac{x-m}{\sigma};$

$$\Phi'(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right); \quad \Phi^{(4)}(z) = (z^3 - 3z) \cdot \Phi(z);$$

$$\Phi^{(5)}(z) = (z^4 - z^2 + 3) \cdot \Phi(z); \quad \Phi^{(6)}(z) = (z^5 - 10z^3 + 15z) \cdot \Phi(z),$$

$A_s$  – асимметрия,

$\varepsilon$  – эксцесс.

Асимметрия и эксцесс определяются по приведенным в приложении А формулам.

Функция  $\Phi(z)$  вычисляется по формуле  $\Phi(x) = 2 \cdot \Phi^*(x) - 1$ ,

где  $\Phi^*(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ . Значения  $\Phi^*(x)$  приведены в табл. Б.3 приложения Б.

Функция Лапласа согласно [49] имеет вид

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^z \exp(-t^2) dt \text{ и ее можно рассчитать и по приближенным соотношениям.}$$

Так с точностью до  $2,5 \cdot 10^{-5}$  интеграл  $\Phi(x)$  имеет вид

$$\Phi(x) = 1 - (\lambda(a_1 + \lambda(a_2 + a_3 \cdot \lambda))) / \exp(x^2),$$

где  $\lambda = 1/(1 + px)$ ;  $a_1 = 0,3480242$ ;  $a_2 = -0,0958798$ ;  $a_3 = 0,7478556$ .

$\Phi(-x) = 1 - \Phi(x)$ . Связь интегралов осуществляется по формулам

$$\Phi(z) = \Phi\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \text{ и } \Phi\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) + 1 = 2 \cdot \Phi^*(x).^1$$

Функция Лапласа необходима для расчета вероятности попадания нормально распределенной случайной величины  $X$  в интервал  $(x_1, x_2)$  [51]

$$P(x_1 < X < x_2) = \frac{1}{2} [\Phi\{(x_2 - m) / \sigma\} - \Phi\{(x_1 - m) / \sigma\}],$$

где  $m, \sigma$  – математическое ожидание и СКО случайной величины.

При сравнительно небольшом отклонении от нормального закона в ряде Эджворта можно удержать только первые члены, образующие А-ряд Шарлье:

$$F(z) = 0,5 + 0,5 \Phi(z) - A_s / 6 \varphi_2(z) + \varepsilon / 24 \varphi_3(z),$$

где  $\varphi_2(z), \varphi_3(z)$  – производные второго и третьего порядка от нормальной плотности вероятности  $\varphi(z)$ ,  $z = (x - M[X]) / \sigma$ ,  $M[X]$  – математическое ожидание,  $\sigma$  – СКО случайной величины  $x$ .

После преобразований получим:

<sup>1</sup> Поэтому при использовании различных источников информации необходимо обращать внимание на вид интеграла и пределы интегрирования.

$$F(z) = \hat{\Phi}(z) + \varphi(z) \cdot [b_0 + b_1 \cdot z + b_2 \cdot z^2 + b_3 \cdot z^3],$$

где  $\hat{\Phi}(z) = 0,5 + 0,5 \cdot \Phi(z)$ ;  $b_0 = A_s/6$ ;  $b_1 = 3 \cdot \varepsilon/24$ ;  $b_2 = -b_0$ ;  $b_3 = -b_1/3$ .

Для практических применений полученного теоретического закона распределения необходимо иметь процедуру формирования датчика случайных чисел, соответствующих полученному закону.

Существуют два пути преобразования случайных величин:

- прямой, который состоит в реализации некоторой операции над числом  $x_i$ , формирующей число  $y_i$ , имеющее (точно или приближенно) заданный закон распределения;
- моделирование условий соответствующей предельной теоремы теории вероятностей.

Первый путь основан на решении относительно  $y_i$  уравнения:

$$\int_{-\infty}^{y_i} f(y) dy = x_i,$$

где  $x_i$  – случайное число, имеющее равномерное распределение в интервале (0, 1).

В этом случае необходимо, чтобы это уравнение имело решение.

Второй путь представляет собой приближенное преобразование случайной величины, основанное на аппроксимации функции плотности.

**Пример 2.8.** Рассмотрим пример, приведенный в предыдущем параграфе. Для исходных данных, приведенных в табл.27, теоретический закон имеет вид:

$$F(z) = \hat{\Phi}(z) + \frac{\exp(-z^2/2)}{(2 \cdot \pi)^{0,5}} \cdot [r_1 + r_2 \cdot z + r_3 \cdot z^2 + r_4 \cdot z^3],$$

где  $r_1 = 0,1697$ ,  $r_2 = 0,0533$ ,  $r_3 = -0,1697$ ,  $r_4 = -0,0178$ .

На рис. 24 приведен график функции теоретического закона  $F(z)$ .

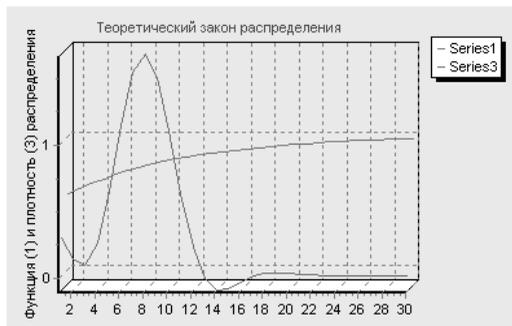


Рис. 24. График функции теоретического закона (построен с помощью программы [24])

## 2.6. Однопараметрическая оптимизация по методу Фибоначчи

Предположим, что нужно определить минимум как можно точнее, то есть с наименьшим возможным интервалом неопределенности, но при этом можно выполнить только  $n$  вычислений функции. Не следует искать решение для всех точек, получаемых в результате эксперимента. Напротив, надо попытаться сделать так, чтобы значения функции, полученные в предыдущих экспериментах, определяли положение последующих точек. Действительно, зная значения функции, то есть информацию о самой функции и положении ее минимума, осуществляется дальнейший поиск [40].

Предположим, что имеется интервал неопределенности  $(x_1, x_3)$  и известно значение функции  $f(x_2)$  внутри этого интервала (рис. 25). Если можно вычислить функцию всего один раз в точке  $x_4$ , то ее местоположение следующим образом.

Пусть  $x_2 - x_1 = L$ , и  $x_3 - x_2 = R$ , причем  $L > R$ , как показано на рис. 25, и эти значения будут фиксированы, если известны  $x_1, x_2$  и  $x_3$ . Если  $x_4$  находится в интервале  $(x_1, x_2)$ , то:

- 1) если  $f(x_4) < f(x_2)$ , то новым интервалом неопределенности будет  $(x_1, x_2)$  длиной  $x_2 - x_1 = L$ ;
- 2) если  $f(x_4) > f(x_2)$ , то новым интервалом неопределенности будет  $(x_4, x_3)$  длиной  $x_3 - x_4$ .

В связи с тем, что не известно, какая из этих ситуаций будет иметь место, выберем  $x_4$  таким образом, чтобы минимизировать наибольшую из длин  $x_3 - x_4$  и  $x_2 - x_4$ . Достигнуть этого можно, сделав длины  $x_3 - x_4$  и  $x_2 - x_4$  равными, то есть поместив  $x_4$  внутри интервала симметрично относительно точки  $x_2$ , уже лежащей внутри интервала. Любое другое положение точки  $x_4$  может привести к тому, что полученный интервал будет больше  $L$ . Помещая  $x_4$  симметрично относительно  $x_2$ , мы ничем не рискуем в любом случае.

Если окажется, что можно выполнить еще одно вычисление функции, то следует применить описанную процедуру к интервалу  $(x_1, x_2)$ , в котором уже есть значение функции, вычисленное в точке  $x_4$ , или к интервалу  $(x_4, x_3)$ , в котором уже есть значение функции, вычисленное в точке  $x_2$ . Следовательно, стратегия такова. Нужно поместить следующую точку внутри интервала неопределенности симметрично относительно уже находящейся там точки.

На  $n$ -м вычислении  $n$ -ю точку следует поместить симметрично по отношению к  $(n - 1)$ -й точке. Положение этой последней точки в принципе зависит от нас. Для того чтобы получить наибольшее уменьшение интервала на данном этапе, следует разделить пополам предыдущий интервал. Тогда точка  $x_n$  будет совпадать с точкой  $x_{n-1}$ . Однако при этом мы не

получаем никакой новой информации. Обычно точки  $x_{n-1}$  и  $x_n$  отстоят друг от друга на достаточном расстоянии, чтобы определить, в какой половине, левой или правой, находится интервал неопределенности.

Они помещаются на расстоянии  $\varepsilon/2$  по обе стороны от середины отрезка  $L_{n-1}$ ; можно самим задать величину  $\varepsilon$  или выбрать эту величину, равной минимально возможному расстоянию между двумя точками.

Интервал неопределенности будет иметь длину  $b_n$ , следовательно,

$$L_{n-1} = 2 \cdot L_n - \varepsilon \quad (\text{рис. 25, нижняя часть}).$$

На предыдущем этапе точки  $x_{n-1}$  и  $x_{n-2}$  должны быть помещены симметрично внутри интервала  $L_{n-2}$  на расстоянии  $L_{n-1}$  от концов этого интервала. Следовательно,

$$L_{n-2} = L_{n-1} + L_n \quad (\text{рис. 25, средняя часть}).$$

*Замечание.* Из рисунка ясно, что на предпоследнем этапе  $x_{n-2}$  остается в качестве внутренней точки.

Аналогично  $L_{n-3} = L_{n-2} + L_{n-1}$  (рис. 25, верхняя часть).

В общем случае

$$L_{j-1} = L_j + L_{j+1} \quad \text{при } 1 < j < n \quad (2.3)$$

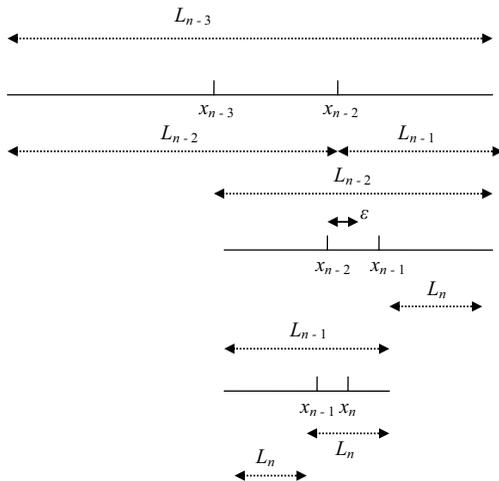


Рис. 25. Интервалы неопределенности

Таким образом,

$$\begin{aligned} L_{n-1} &= 2L_n - \varepsilon, \\ L_{n-2} &= L_{n-1} + L_n = 3L_n - \varepsilon, \\ L_{n-3} &= L_{n-2} + L_{n-1} = 5L_n - 2\varepsilon, \\ L_{n-4} &= L_{n-3} + L_{n-2} = 8L_n - 3\varepsilon \text{ и т.д.} \end{aligned}$$

Если определить последовательность чисел Фибоначчи следующим образом:

$$\begin{aligned} F_0 &= 1, F_1 = 1 \text{ и } F_k = F_{k-1} + F_{k-2} \text{ для } k = 2, 3, \dots, \text{ то} \\ L_{n-j} &= F_{j+1} L_n - F_j \varepsilon, \quad j = 1, 2, \dots, n-1. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Если начальный интервал  $(a, b)$  имеет длину  $L_1 = (b - a)$ , то

$$L_1 = F_n L_n - \varepsilon F_{n-1}, \text{ т. е.}$$

$$L_n = \frac{L_1}{F_n} + \varepsilon \cdot \frac{F_{n-1}}{F_n}.$$

Произведя  $n$  вычислений функции по приведенным формулам, уменьшаем начальный интервал неопределенности в  $1/F_n$  раз по сравнению с его начальной длиной (пренебрегая  $\varepsilon$ ), и получаем наилучший результат.

Если поиск начат, то его несложно продолжить, используя описанное выше правило симметрии. Следовательно, необходимо найти положение первой точки, которая помещается на расстоянии  $L_2$  от одного из концов начального интервала, причем не важно, от какого конца, поскольку вторая точка помещается согласно правилу симметрии на расстоянии  $L_2$  от второго конца интервала:

$$L_2 = F_{n-1} \cdot L_n - \varepsilon \cdot F_{n-1} = F_{n-1} \cdot \frac{L_1}{F_n} + \varepsilon \cdot \frac{(F_{n-1} F_{n-1} - F_n F_{n-1})}{F_n} = \frac{F_{n-1}}{F_n} \cdot L_1 + \frac{(-1)^n \cdot \varepsilon}{F_n}. \quad (2.5)$$

После того как найдено положение первой точки, числа Фибоначчи больше не нужны. Используемое значение  $\varepsilon$  может определяться из практических соображений. Это значение должно быть меньше  $L_1 / F_{n+1}$ , в противном случае решение отсутствует.

Таким образом, поиск методом Фибоначчи, названный так ввиду появления при поиске чисел Фибоначчи, является итерационной процедурой. В процессе поиска интервала  $(x_1, x_2)$  с точкой  $x_2$ , уже лежащей в этом интервале, следующая точка  $x_4$  всегда выбирается такой, что  $x_3 - x_4 = x_2 - x_1$  или  $x_4 - x_1 = x_3 - x_2$ , то есть

$$x_4 = x_1 - x_2 - x_3. \quad (2.6)$$

Если  $f(x_2) = f_2$  и  $f(x_4) = f_4$ , то можно рассмотреть четыре случая (рис. 26).

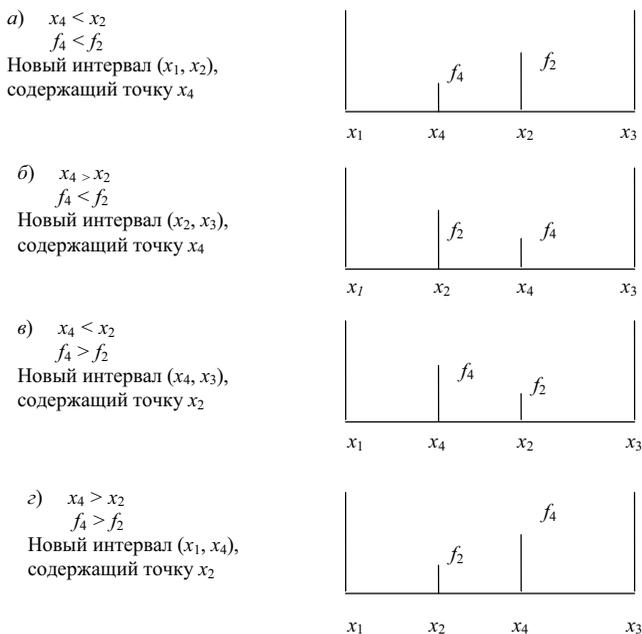


Рис. 26. Случаи взаимного расположения точек  $x_2$  и  $x_4$

**Пример 2.9.** Найти минимум функции  $f(x) = x^4 - 14x^3 + 60x^2 - 70x$  в интервале  $(0,2)$ . Применение метода Фибоначчи дает минимум функции  $f(x) = -24,3496$  при  $x = 0,780804$ .

## 2.7. Многопараметрическая оптимизация по методу Хука–Дживса

Этот метод был разработан в 1961 году, но до сих пор является весьма эффективным и оригинальным. Поиск состоит из последовательности шагов исследующего поиска вокруг базисной точки, за которой в случае успеха следует поиск по образцу [40].

Описание этой процедуры представлено ниже:

А. Выбрать начальную базисную точку  $b_1$  и шаг длиной  $h_j$  для каждой переменной  $x_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ .

Б. Вычислить  $f(x)$  в базисной точке  $b_1$  с целью получения сведений о локальном поведении функции  $f(x)$ . Эти сведения будут использоваться для нахождения подходящего направления поиска по образцу, с помощью которого можно надеяться достичь большего убывания значения функции. Функция  $f(x)$  в базисной точке  $b_1$  находится следующим образом:

1. Вычисляется значение функции  $f(x)$  в базисной точке  $b_1$ .

2. Каждая переменная по очереди изменяется прибавлением длины шага. Таким образом, вычисляется значение функции  $f(b_1 + h e_1)$ , где  $e_1$  – единичный вектор в направлении оси  $x_1$ . Если это приводит к уменьшению значения функции, то  $b_1$  заменяется на  $b_1 + h_1 e_1$ . В противном случае вычисляется значение функции  $f(b_1 - h_1 e_1)$ , и если ее значение уменьшилось, то  $b_1$  заменяем на  $b_1 - h_1 e_1$ . Если ни один из проделанных шагов не приводит к уменьшению значения функции, то точка  $b_1$  остается неизменной и рассматриваются изменения в направлении оси  $x_2$ , то есть находится значение функции  $f(b_2 + h_2 e_1)$  и т.д. Когда будут рассмотрены все  $n$  переменные, мы будем иметь новую базисную точку  $b_2$ .

3. Если  $b_2 = b_1$ , то есть уменьшение функции не было достигнуто, то исследование повторяется вокруг той же базисной точки  $b_1$ , но с уменьшенной длиной шага. На практике удовлетворительным является уменьшение шага (шагов) в десять раз от начальной длины.

4. Если  $b_2 \neq b_1$ , то производится поиск по образцу.

В. При поиске по образцу используется информация, полученная в процессе исследования, и минимизация функции завершается поиском в направлении, заданном образцом. Эта процедура производится следующим образом:

1. Разумно двигаться из базисной точки  $b_2$  в направлении  $b_2 - b_1$ , поскольку поиск в этом направлении уже привел к уменьшению значения функции. Поэтому вычислим функцию в точке образца:

$$P_1 = b_1 + 2 \cdot (b_2 - b_1).$$

В общем случае

$$P_i = b_i + 2 \cdot (b_{i+1} - b_i). \quad (2.7)$$

2. Затем исследование следует продолжать вокруг точки  $P_1 (P_i)$ .

3. Если наименьшее значение на шаге В, 2 меньше значения в базисной точке  $b_2$  (в общем случае  $b_{i+1}$ ), то получают новую базисную точку  $b_3(b_{i+2})$ , после чего следует повторить шаг В, 1. В противном случае не производить поиск по образцу из точки  $b_2 (b_{i+1})$  продолжить исследования в точке  $b_2 (b_{i+1})$ .

Г. Завершить этот процесс, когда длина шага (длины шагов) будет уменьшена до заданного малого значения.

На рис. 27–28 представлены блок-схемы данного метода.

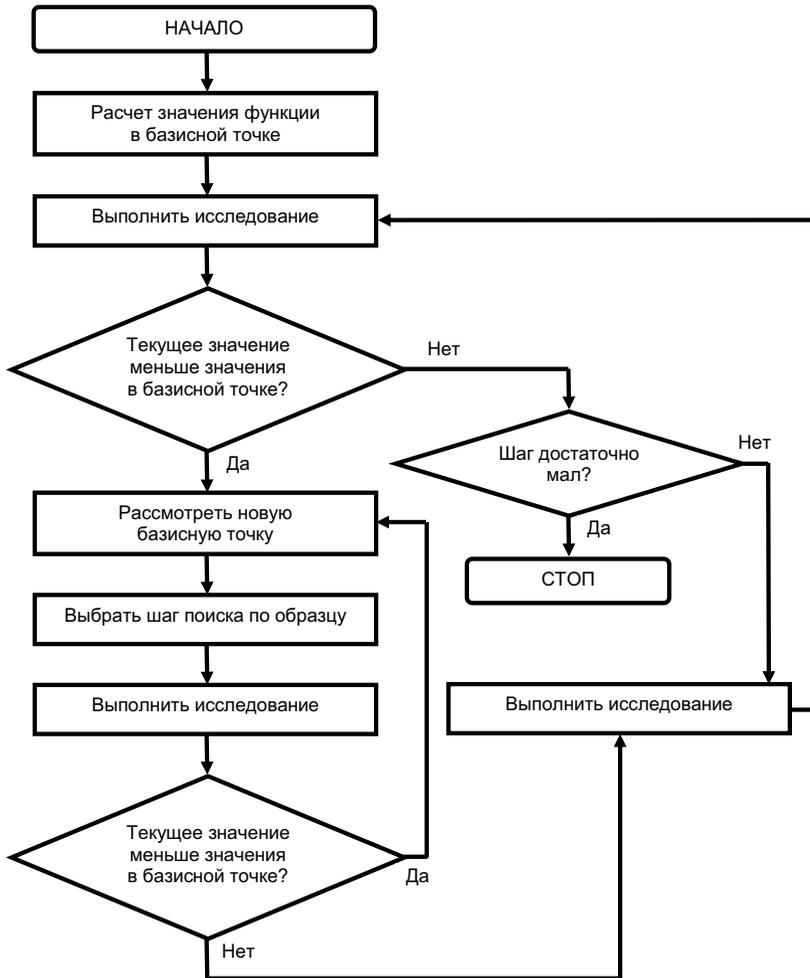


Рис. 27. Исследование вокруг базисной точки

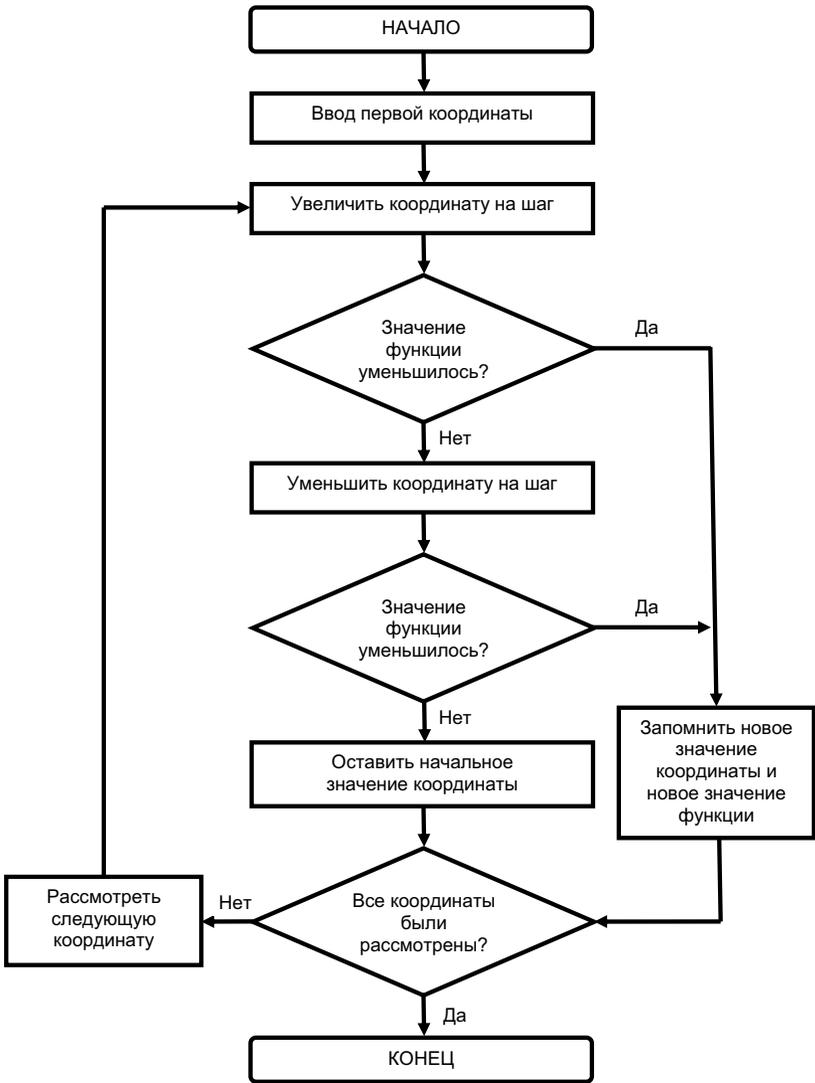


Рис. 28. Поиск по образцу

**Пример (тест) 2.10.** Для отработки программного обеспечения расчетов по оптимизации методом Хука-Дживса рекомендуется использовать минимизацию функции  $f(x_1, x_2, x_3) = (x_1 - 2)^2 + (x_2 - 5)^2 + (x_3 + 2)^4$ . Минимум, очевидно, находится в точке (2; 5; -2). Это сделано для того, чтобы исключить ошибочные расчеты по программе минимизации функции.

**Пример 2.11.** Оптимизация по методу Хука-Дживса

Пусть функция  $\psi$  является функцией ошибок доставки СТС, радиуса зоны обзора информационного блока, вероятностей правильного обнаружения, ложных тревог, размеров площадного объекта.

Введенный обобщенный показатель  $\psi(R)$  является функцией, максимальное значение которой соответствует максимуму эффективности выполнения целевой задачи и может служить в качестве критерия для оценки доставки группы СТС. Это следует из непротиворечивости этого показателя общему согласно работе [32].

Введенный таким образом обобщенный показатель характеризует именно эффективность СТС.

Этот показатель может быть оптимизирован по параметрам зоны обзора информационного блока (ИБ) – радиусу  $R$ , так как с увеличением размеров зоны обзора вероятность попадания монотонно возрастает, а вероятность правильного обнаружения – монотонно убывает.

Для случаев, когда распределение СТС в пространстве  $F_x(x)$  и  $F_z(z)$  можно считать нормальными с математическим ожиданием  $M_x = M_z = 0$  и  $\sigma_x^2, \sigma_z^2$  дисперсиями определяемыми точностью средств целеуказания, ошибками доставки и рассеивания СТС, функция примет вид (для симметричного объекта)

$$\psi(R) = \frac{1}{N_i} \left[ 2 \cdot \Phi \left( \frac{x_0 + R}{\sigma_x} \right) - 1 \right] \cdot \left[ 2 \cdot \Phi \left( \frac{z_0 + R}{\sigma_z} \right) - 1 \right] \cdot \gamma \cdot P(M) \cdot P_1 \cdot P_{\text{Пл}}$$

где  $N_i$  – количество истинных объектов в зоне обзора;

$x_0, z_0$  – координаты площадного объекта;

$R$  – радиус круговой зоны обзора;

$\gamma$  – коэффициент истинности объекта;

$P(M)$  – вероятность правильного обнаружения;

$P_1$  – вероятность срабатывания блока по истинному объекту;

$P_{\text{Пл}}$  – вероятность попадания зоны обзора на площадной объект.

Поиск оптимальных значений  $R$  по критерию  $\psi(R) = \max$  в общем случае аналитически невозможен. Поэтому проводится оптимизация данного выражения с привлечением численных методов [40]. Возможны два случая:

- при круговых зонах обзора ИБ имеет место однопараметрическая оптимизация;
- при зонах обзора, аппроксимируемых прямоугольником – двухпараметрическая оптимизация.

Однопараметрическая оптимизация может проводиться по *методу Фибоначчи*, двухпараметрическая – по *методу Хука–Дживса* [40].

Из рис. 29 видно, что одни вероятности являются монотонно возрастающими, а другие – монотонно убывающими функциями. На рис. 30 приведены графики различных видов функции  $\psi(R)$ , из которых видно, что в общем случае функция может иметь до трех локальных максимумов либо существует диапазон изменения  $R$ , при котором  $\psi = \text{const}$ . Во втором случае при оптимизации в качестве оптимальной выбирается левая точка данного интервала изменения  $R$ .

Методы Фибоначчи и Хука–Дживса позволяют отыскивать только один максимум функции, поэтому целесообразно использовать модифицированный метод, суть которого состоит в следующем:

- отыскиваются интервалы вероятностного нахождения локальных максимумов;
- проводится оптимизация функции в полученных интервалах;
- глобальный максимум выбирается путем сравнения локальных.

Для иллюстрации на рис. 31 приведены зависимости оптимального радиуса  $R$  от различных параметров: от размеров группы объектов, точности доставки и т.д. Для заданного площадного объекта (на рис. 31 это  $400 \times 400$  м,  $400 \times 500$  м и  $600 \times 700$  м) и для рассчитанной точности  $3\sigma = 150$  м, например, при полученных величинах вероятностей ложных тревог  $P_{\text{лт}} = 10^{-7}$  и правильного обнаружения объектов  $P_{\text{по}} = 0,7$  оптимальный радиус равен: для объекта  $400 \times 400$  м – 80 м, для объекта  $400 \times 500$  м – 70 м и для объекта  $600 \times 700$  м – 150 м. Варьируя величину  $\sigma$  (СКО доставки СТС в район применения), можно построить такие зависимости для конкретных условий задачи.

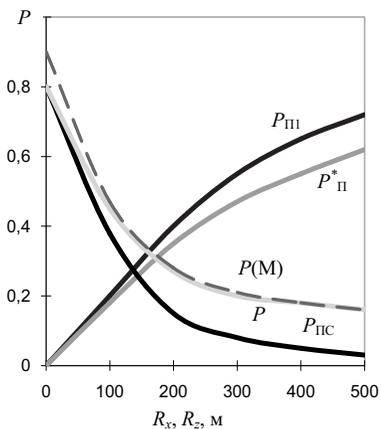


Рис. 29. Графики зависимостей составляющих критерия оптимизации  $P_{П1}, P_{П}^*, P(M), P_{Пс}$

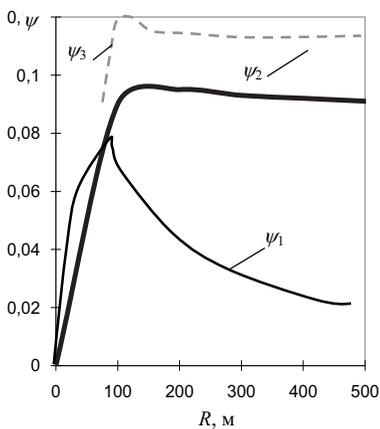


Рис. 30. Зависимости различных видов функции  $\psi(R)$

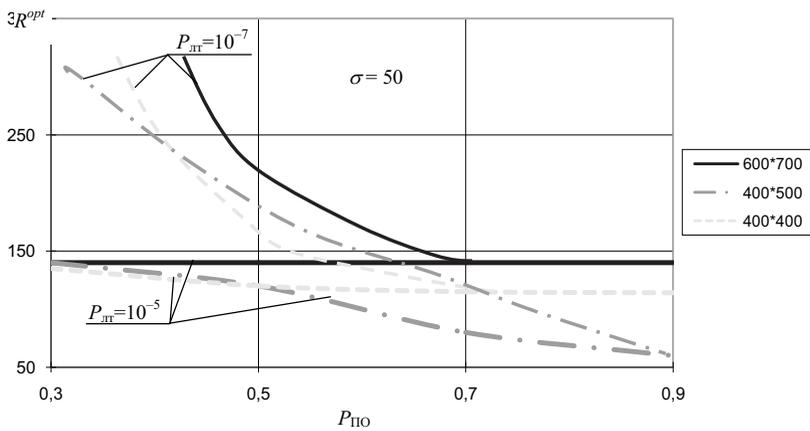


Рис. 31. Зависимости оптимального радиуса зоны обзора  $R^{opt}$  для трех площадных объектов

## 2.8. Численный метод оптимизации системы

Существует много способов решения оптимизационной системы, отличающихся как точностью, так и временем расчетов на ЭВМ.

Пусть на основе применения системного анализа была сформирована функция  $P = f(a_1, a_2, \dots, a_m)$ , где  $a_1, a_2, \dots, a_m$  – параметры системы и подсистем.

Например, для робототехнической системы это могут быть точность доставки роботов в заданное место, радиус действия радиосистемы, помехозащищенность, точность системы управления, дальность обнаружения объекта и т.п.

Задача состоит в том, чтобы найти  $P = f(a_1, a_2, \dots, a_m) = \max$ . Для безусловного экстремума функции  $P$  необходимым условием оптимума является равенство нулю градиента функции:

$$\nabla P(a_1, a_2, \dots, a_m) = \left( \frac{\partial P}{\partial a_1}, \dots, \frac{\partial P}{\partial a_m} \right) = 0.$$

Достаточным условием минимума функции является

$\Delta \bar{a}^T H(\bar{a}) \cdot \Delta \bar{a} \geq 0$  при любых  $\Delta \bar{a} \neq 0$ , где  $\bar{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}^T$  – вектор параметров системы;  $H = \left[ \frac{\partial^2 P(a_1, a_2, \dots, a_m)}{\partial a_i \partial a_j} \right]$ ,  $i, j = 1, \dots, m$ ;  $H$  – гессиан функции  $P(\bar{a})$ .

На основе применения метода декомпозиции удается представить систему в виде подсистем, позволяющих записать функцию  $P = \prod_{i=1}^n P_i$ , где  $n$  – число подсистем,  $P_i$  – выходная функция  $i$ -й подсистемы.

Пусть каждую функцию из составляющих  $P$  можно аппроксимировать на интервале  $(b_1, b_2)$  квадратным трехчленом вида  $(cb^2 + db + e)$ .

**Пример 2.12.** Пусть функция  $P$  представима как зависимость от параметра  $R$  (причем  $a_1 = R$ ), а остальные параметры  $a_2, \dots, a_m$  входят в коэффициенты  $c_i, d_i, e_i$ . Тогда  $P$  имеет вид

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 = \prod_{i=1}^3 (c_i \cdot R^2 + d_i \cdot R + e_i).$$

Тогда  $P'_i = 2c_i R + d_i$ ;  $P' = \sum_{i=1}^3 (2c_i R + d_i) \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^3 (c_j R^2 + d_j R + e_j)$  или  $P' = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 B_{ij} R^j$ ,

где  $B_{ij}$  – коэффициенты, выражаемые через величины  $c_i, d_i, e_i$ .

Гессиан  $H$  вычисляется как матрица вторых частных производных:

$H = \{g_{ij}\}$ ,  $i, j = 1, \dots, m$ , где функции  $g_{ij}$  легко вычисляются.

В случае невозможности аппроксимировать функцию одной параболической зависимостью целесообразно использовать двусторонний прерыватель [7]. Тогда

$$P = \sum_{j=1}^n I_{b_j}^{b_{j+1}}(x)(c_j b^2 + d_j b + e_j), \text{ где } I_{b_j}^{b_{j+1}}(x) = \frac{1}{2} \left[ \frac{|x - b_j|}{x - b_j} - \frac{|x - b_{j+1}|}{x - b_{j+1}} \right],$$

где  $n$  – количество сопрягаемых участков кривой.

Рассмотрим следующий метод решения системы уравнений, которую запишем в виде

$$\Phi_i(x_1, x_2, \dots, x_m) = 0, \quad i = 1, \dots, m.$$

Перепишем данную систему уравнений в виде

$$x_i + \lambda_i \Phi_i(x) = x_i, \quad i = 1, \dots, m, \text{ где } \lambda_i - \text{множитель.}$$

Обозначим левую часть через функцию  $\varphi_i(x_i)$ , тогда если  $\left| \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i} \right| < 1$ , то есть

$$\left| 1 + \lambda_i \frac{\partial \Phi_i}{\partial x_i} \right| < 1, \text{ сходимость итерационного процесса гарантирована [52,53].}$$

Расчет полученной системы уравнений ведется до выполнения условия

$$\left| x_{i,k} - x_{i,k-1} \right| < \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, m, \text{ где } \varepsilon_i - \text{заданная точность вычислений } i\text{-й переменной для}$$

$k$ -й итерации.

В качестве начального приближения выбираются параметры  $\{a_i\} = \{a_i^0\}$ , равные левому значению диапазона граничных величин, определенных из технической реализуемости подсистем проектируемой системы (комплекса).

Данный подход позволяет, имея наборы зависимостей для подсистем, оперативно получать для них наиболее рациональные параметры, обеспечивающие оптимальные режимы функционирования системы.

**Пример 2.13.** На рис. 32 приведена диаграмма результатов расчета доставки роботов в заданный район земной поверхности для случая, когда в качестве информационного блока используется инфракрасная головка наведения, в системе управления реализован метод пропорциональной навигации. Ввиду громоздкости выражения для  $P_i$  здесь не приводятся.

Диаграмма, представленная на рис. 32, позволяет разработчику системы судить о наличии взаимосвязи всех параметров подсистем, удовлетворяющих общему критерию эффективности.

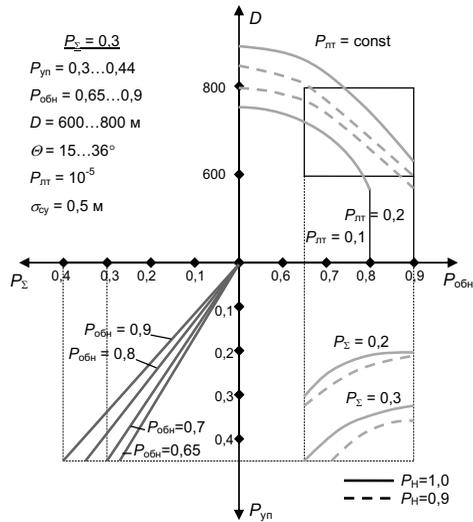


Рис. 32. Результаты оптимизации уравнений функционирования системы

$P_{\Sigma}$  – суммарная вероятность выполнения задачи;  $P_{уп}$  – вероятность попадания в маяк;  $D$  – дальность обнаружения маяка;  $P_{ит}$  – вероятность ложных тревог;  $\sigma_{сy}$  – СКО системы управления;  $\theta$  – угол подхода к маяку;  $P_{ис}$  – вероятность ложных срабатываний;  $P_{н}$  – надежность системы;  $P_{обн}$  – вероятность обнаружения маяка

## 2.9. Оценка тенденции развития СТС

Расчет параметров облика сложной системы можно формализовать в предположении, что рассматривается некий обобщенный класс систем доставки роботов в заданный район, имеющий одинаковые этапы функционирования. Например, доставка носителем, разброс в пространстве, выбор объекта, наведение в заданную область пространства (или на выбранный объект).

Используя различные математические модели (аналитические, имитационные, статистические), можно рассчитать параметры отдельных подсистем системы.

Системный подход к решению задачи выбора параметров СТС состоит в следующем.

1. Формируется банк исходных данных по носителю (самолет, БЛА, ДПЛА), СТС, группе объектов, единичному объекту, ограничениям, условиям функционирования системы (метеорологических т.п.). Проверяется наличие в банке информации необходимых табличных данных.

2. Рассчитываются требуемые характеристики СТС:  $n$  – число СТС в блоке,  $F(x, z)$  – закон распределения СТС в пространстве после их разведения из блока,  $P$  – вероятность по-

падания в объект при условии его нахождения в зоне обзора,  $R_{зо}$  - радиус зоны обзора информационного блока.

3. Рассчитываются точностные характеристики доставки СТС в район функционирования.

4. На 2-м уровне рассчитываются характеристики отдельных подсистем (например, рассчитываются параметры информационного блока):

$P_{по}$  – вероятность правильного обнаружения;

$P_{лт}$  – вероятность ложных срабатываний ИБ,

$P_{нав}$  – вероятность наведения на маяк и т.п.

На последующих этапах рассчитываются характеристики каждой подсистемы СТС. Для системы управления – это  $F_{поп}(x, z)$  – закон распределения точек попадания в район объекта,  $\sigma_{поп}$  – среднеквадратическая ошибка попадания (наведения); потребные и располагаемые перегрузки, тип и метод управления; типы исполнительных органов; состав измерений, поступающий с ИБ и др.

5. Рассчитываются законы распределения входных и выходных величин.

6. Рассчитывается вероятность выполнения заданной задачи, возможные риски, оценивается надежность СТС в условиях помех (естественных и искусственных). При необходимости проводится экспертная оценка СТС и ее подсистем [54].

7. В процессе проведения расчетов для различных значений количества СТС и объектов формируется матрица возможных вариантов технических решений СТС (штатных, нетрадиционных) (см. рис. 33, а), которая ранжируется с помощью спектрального метода. По результатам ранжирования  $K_p$  выбираются наиболее рациональные технические решения СТС, которые могут быть рекомендованы для последующих этапов реализации, проектирования, испытаний и т.п.

Составив матрицу параметров технических обликов альтернативных вариантов СТС и рассчитав с помощью ранжирования величины комплексного показателя технического облика ( $K_{ПТО}$ ), можно построить области путей развития СТС, которые дают наглядную возможность определить наиболее приоритетные направления развития СТС.

На рис. 33, б иллюстрируется пример построения путей развития СТС при ранжировании по параметрам: массогабаритным характеристикам, радиусу зоны обзора, вероятности выполнения задачи, стоимости и типам.

Так, на рисунке: тип 1 – стандартный,  $m_1$ ; тип 2 – стандартный,  $m_2$  (при этом  $m_1 < m_2$ ); тип 3 – с блоком навигации,  $m_3$ ; тип 4 – с блоком навигации,  $m_4$ ; тип 5 – с блоком навигации,  $m_5$  (при этом  $m_3 < m_4 < m_5$ ); тип 6 – с тормозным устройством,  $m_6$ .

Проведя анализ данных рис. 33 убедимся, что наиболее перспективным является путь построения СТС с комбинированным датчиком объекта (в том числе и БТС) и средними габаритными размерами.

Анализируя такие графические представления путей развития СТС, можно выбрать наиболее приемлемые для реализации при наличии соответствующих технологий и элементной базы. По вертикали графиков отмечены типы доставки: традиционный, дистанционного управления, нетрадиционный. Стрелками указан рост требований к характеристикам СТС и ее стоимости. Очевидно, что перспективные технологии при определенных стоимостях будут иметь преимущества перед традиционными способами реализации СТС.

В дальнейшем основной задачей перед потребителем будет разумное распределение имеющихся финансовых затрат и интегральными характеристиками СТС.

\* \* \*

В главе приведены некоторые необходимые методы, снабженные примерами и указаниями.

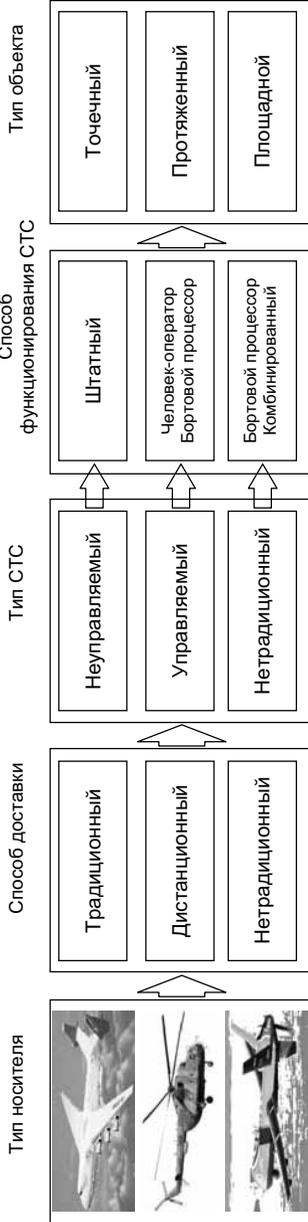


Рис. 33 а. Схема построения альтернативных вариантов системы

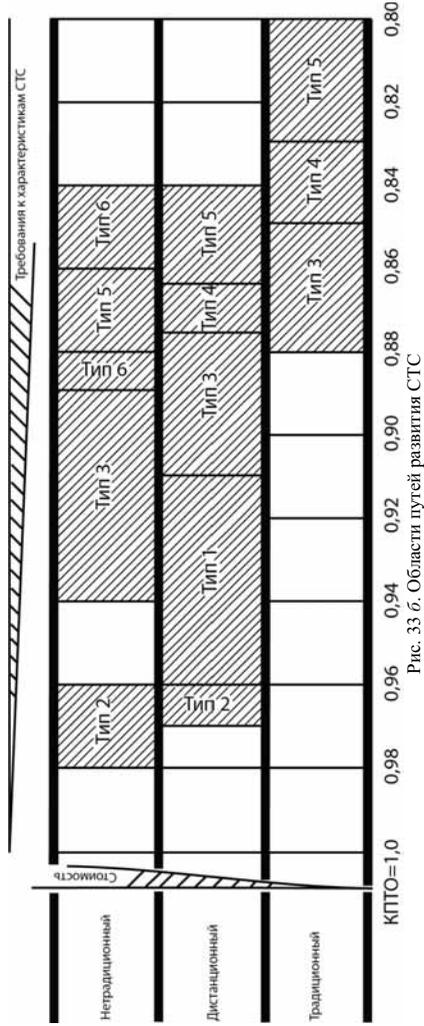


Рис. 33 б. Области путей развития СТС

## Глава 3. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА К ОБЩЕЙ СТРУКТУРЕ СТС

### 3.1. Общее представление СТС

Применяя материал главы 1 можно уточнить особенности системного анализа при проектированию СТС. На первом этапе исследований составляется общая структура СТС, приведенная на рис. 34.

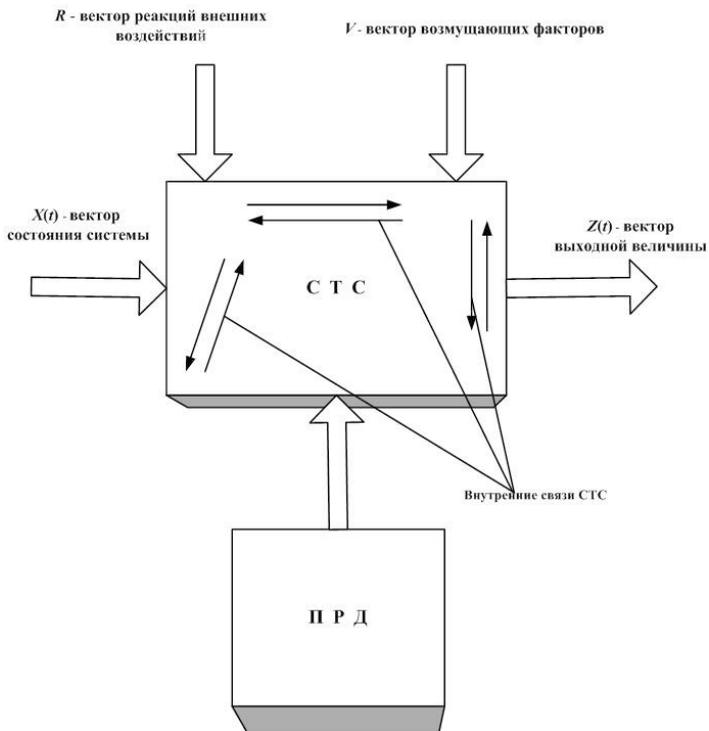


Рис. 34. Общая структура СТС

На рис. 34 обозначено: на входе СТС – вектор состояния системы  $X(t)$ , на выходе – вектор выходной величины  $Z(t)$ . Вектор возмущающих факторов  $V$  представляет собой ветровые, климатические, погодные и т.п. воздействия. Вектор  $R$  – вектор реакций внешних воздействий, включающих естественное и искусственное противодействие (подробнее см. главу 7). Блок ПРД это модуль защиты СТС от внешних воздействий. Внутренние связи приведены в разд. 3.2.

На рис.35 приведены виды структур СТС, которые разделяются на сетевую и иерархическую.

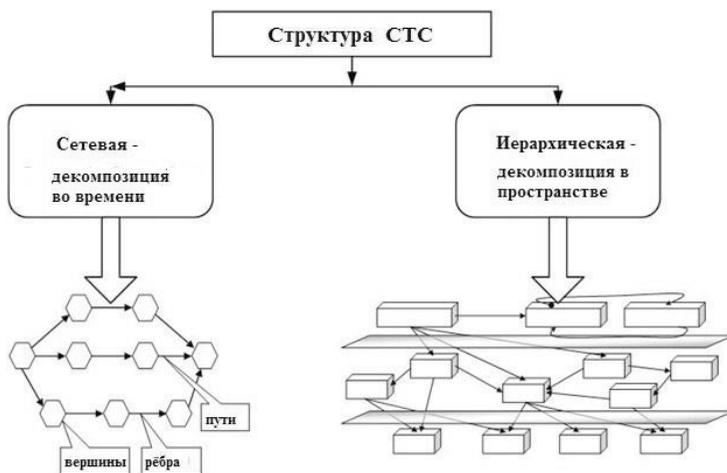


Рис. 35 . Виды структур СТС

В соответствии с принципами системного анализа (глава 1) можно сформулировать трехуровневую схему структуры СТС, приведенную на рис. 36. Уровень 1 – уровень надсистемы, на котором формируется общие требования к СТС с учетом условий ее функционирования. Уровень 2 – это уровень исследования собственно системы. Уровень 3 – рассмотрение и исследование подсистем и модулей СТС.

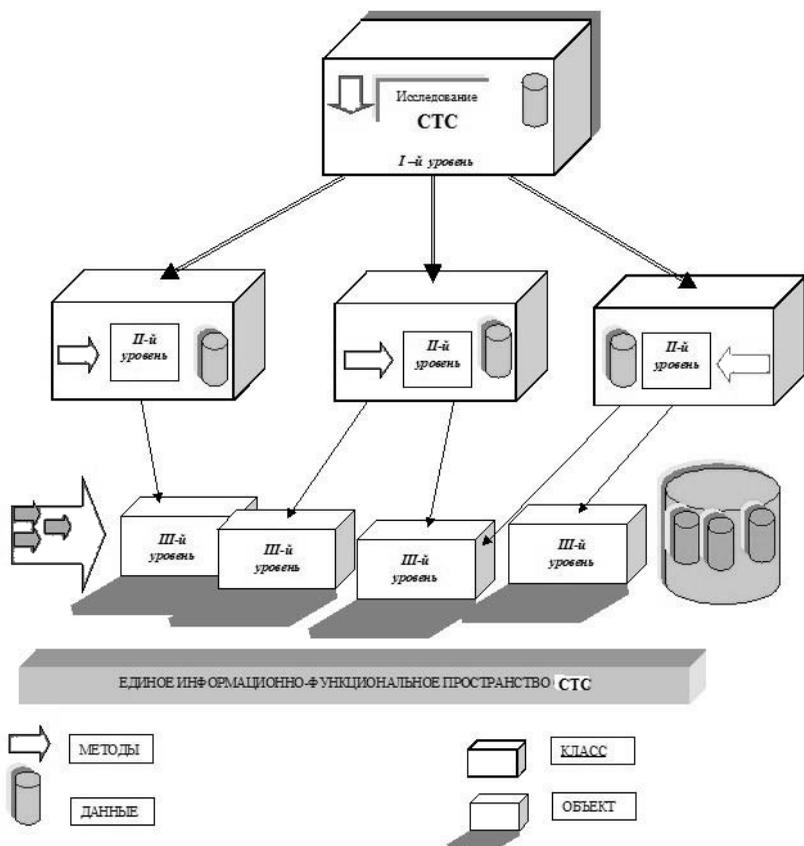


Рис. 36. Иерархическое представление СТС

На рис. 36 приведена обобщенная триединая схема исследований, из которой видно взаимодействие всех уровней и типов данных на каждом отдельном уровне. На первом и втором уровнях используются классы, на третьем уровне – где на основе классов выбираются конкретные параметры модулей, формируются объекты. На всех уровнях необходим набор методов и данных, на основе которых проводится анализ и проектирование уровня.

На рис. 37 приведено пояснение понятий инкапсуляция, наследование и полиморфизм, являющихся основой построения объектно-ориентированного подхода.

Иерархическое представление СТС, приведенное на рис. 36 является

обобщающим типовым представлением комплекса или системы. Так для СТС справедлива эта же структура представления, только в каждом конкретном случае СТС будут выступать в роли надсистемы для ниже стоящих уровней. Такое построение позволяет осуществлять проектирование сверху вниз по единым типовым подходам.



Рис. 37. Пояснения понятий объектно-ориентированного подхода

На рис. 38 приведены возможные типовые виды подсистем и модулей, разделяющиеся на постоянный, переменный и временный наборы.

Из рассмотрения уровня 1 следует пять основных этапов исследования:

- анализ исходного состояния;
- информационный блок (потoki информации в СТС);
- принятие решения о логике функционирования СТС;
- подготовительные действия;
- результат.

Для проверки и подтверждения правильности результатов используется прямая задача эффективности, т.е. используя параметры и характеристики СТС и ее подсистем проводится расчет эффективности по формулам теории вероятности, математической статистики и теории дифференциальных уравнений.

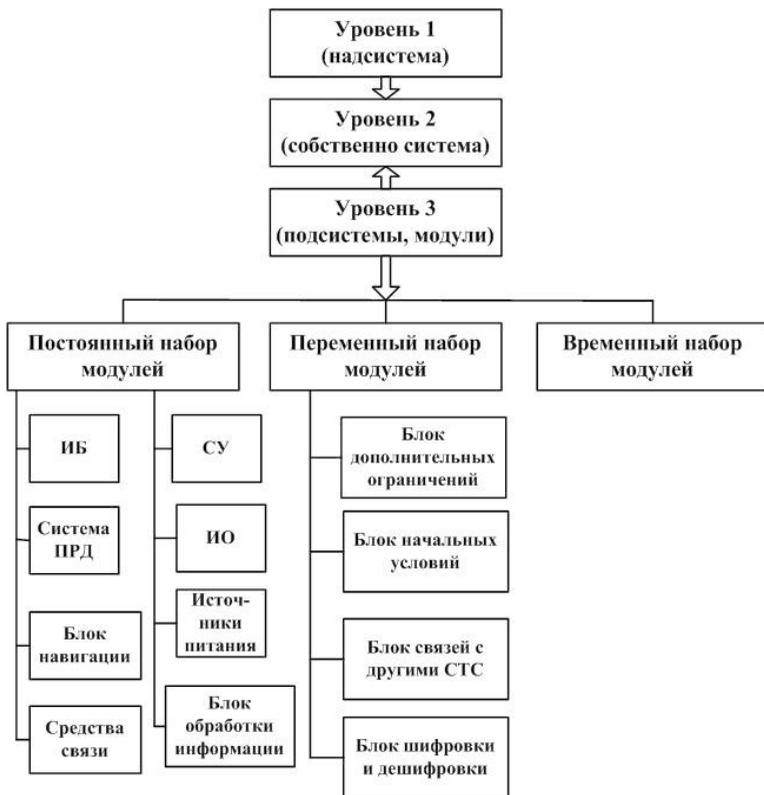


Рис. 38. Обобщенная структура СТС

ИБ – информационный блок; СУ – система управления; ИО – исполнительные органы;  
ПРД - противодействие

Исходя из введенного в главе 1, трехуровневого построения исследований СТС на рис. 39 приведена соответствующая объектно-ориентированная схема исследования СТС. На рис. 40 приведена интегрированная схема исследований, на которой отображены результаты, полученного из рис. 39. Другими словами, из задачи  $U$  формируется технический облик СТС и ее интегральные характеристики, проводится оценка эффективности  $\mathcal{E}=f(\tau, \pi)$ , формируются характеристики ТО СТС и направления его развития.

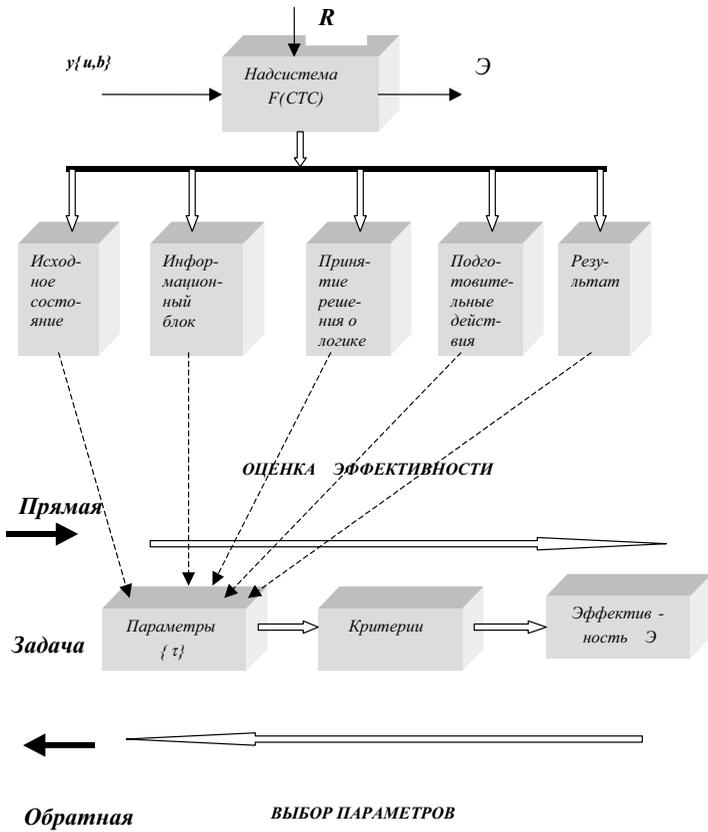


Рис. 39. Объектно-ориентированная схема исследования СТС  
 $F(СТС)$  – обобщенная функция, описывающая взаимосвязь надсистемы с СТС;  $R$  – вектор реакций;  $y(u, b)$  – вектор входных параметров;  $u$  – вектор состояния;  $b$  – вектор возмущений;  $Э$  – эффективность выполнения задачи

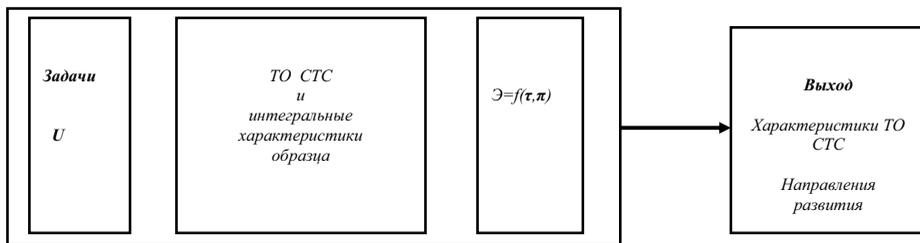


Рис. 40. Интегрированная схема исследований

### **Обратная задача применительно к проектированию сложных технических комплексов**

В разд. 1.7 были приведены определения прямой и обратной задач.

Одним из направлений в решении «обратных» задач является подход, основанный на оптимизации проектных и тактических параметров СТС, позволяющий учитывать структурные связи подсистем и их влияние на общий, частный и обобщенный показатели эффективности (рис. 41). Ниже представлены основные достоинства такого подхода.

Важным этапом исследования СТС является решение обратной задачи, когда по заданной конечной цели (математическое ожидание, дисперсия, закон распределения величин) проводится оптимизация параметров подсистем СТС и формируется матрица альтернативных вариантов ТО подсистем и модулей, входящих в структуру СТС. Применение метода ранжирования (разд. 2.1.) позволяет свести матрицу вариантов к виду, удобному для дальнейшей работы проектантам.

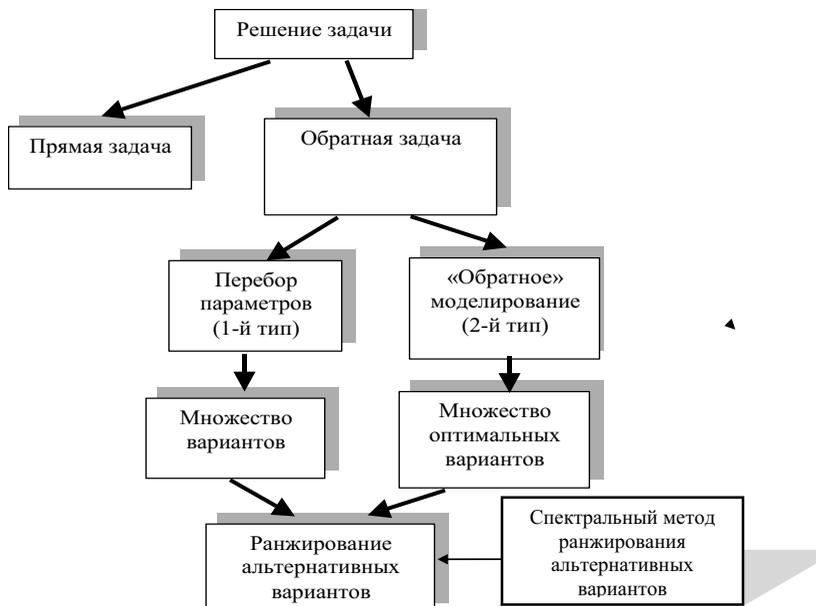


Рис. 41. Множество решаемых задач

Эталонный закон это фактически идеальное решение поставленной перед СТС задачи.

**Пример 3.1.** Если необходимо доставить и расположить  $n$  СТС равномерно на площади  $S=a \times b$ . В этом случае целесообразно в качестве эталонного закона использовать *равномерный закон распределения по площади*.

$$f(x, z) = \frac{1}{4l_x l_z}, \quad m_x - l_x < x < m_x + l_x, \quad m_z - l_z < z < m_z + l_z,$$

где  $2l_x \times 2l_z$  – размеры площадки;  $m_x, m_z$  – математические ожидания по соответствующим осям.

В общем случае, исходя из требований поставленной задачи, проводится расчет эффективности применения данного средства и определяется вид эталонного закона. В разд. 2.4 и 2.5 приведены виды законов распределения величин и методика расчета параметров теоретического закона в случае невозможности аппроксимации результатов испытаний существующими типовыми законами распределения случайных величин.

После определения эталонного закона проводится собственно оптимизация системы. Математически задача представляет собой минимизацию выражения (см. разд. 1.7)

$$D(F(x,z)) = \min_{\sigma_p} \left\{ \max_{x,z} | F(x,z) - F^{эм}(x,z) | \right\},$$

где  $D(\cdot)$  - показатель критерия согласия Колмогорова;  $F(x,z)$  - закон распределения величин в зависимости от тактических и проектных параметров СТС;  $F^{э\text{т}}(x,z)$  - эталонный закон распределения.

Применяя численные методы (например, методы Фибоначчи, Хука-Дживса, и т.п.) строятся графики и номограммы, используемые при проектировании рассматриваемых СТС и их подсистем и модулей.

В случае отсутствия математического описания процессов в виде законов распределения, целесообразно пользоваться соответствующими аналогами. При наличии аналогов можно провести натурные испытания по методике, приведенной в разд. 2.5 и определить вид теоретического закона распределения. После проведения проектирования СТС и ее реализации в готовом виде, проводятся аналогичные испытания и определяются законы распределения. Из сравнения законов распределения можно сделать вывод о справедливости выбора технических решений при реализации технического облика СТС.

**Пример 3.2.** Рассмотрим гипотетический пример обработки данных при проведении экспериментов с биообъектом[5]. В результате эксперимента над биообъектом в качестве стимула был использован биопотенциал, воздействующий на соответствующую зону мозга, в котором вырабатывается ощущение удовольствия.

В результате эксперимента фиксируется время обнаружения биообъектом вещества при случайном изменении положения вещества на местности. По результатам замера откликов биообъекта была получена матрица результатов времен (в мин.), приведенная в табл. 28.

Обработка данных, приведенных в табл. 28, приведена на рис. 42, из которого видно, что закон распределения времени обнаружения объекта по критерию Колмогорова с вероятностью 0,9 близок к равномерному с математическим ожиданием равным

$m=2,6$  мин и СКО  $\sigma=1,43$  мин. Теоретический закон распределения имеет вид:

$$F(t) = \hat{\Phi}(z) + \exp(-z^2 / 2) / (2 \times \pi)^{0,5} \times [r_1 + r_2 \times z + r_3 \times z^2 + r_4 \times z^3],$$

где  $z = (t - m) / \sigma$ , причем коэффициенты равны  $r_1=0,0283$ ;  $r_2=-0,1464$ ;  $r_3=0,0283$ ;  $r_4=0,0488$ .

Таблица 28. Данные эксперимента по фиксации времени  $t$  обнаружения вещества (100 наблюдений)

0,97	1,64	2,90	1,28	0,64	4,24	2,94	1,78	1,41	1,06
3,68	2,96	4,32	0,04	0,30	0,81	3,16	2,67	3,94	1,15
2,67	0,34	0,44	2,77	2,34	4,90	4,15	2,78	4,35	4,47
1,76	3,68	1,43	3,46	0,90	2,26	3,53	2,89	0,06	3,88
0,03	4,70	1,77	3,66	1,61	4,26	2,15	0,37	4,03	4,92
0,38	3,27	3,72	4,50	1,41	1,51	1,60	4,89	1,56	1,81
3,67	2,75	3,47	1,46	4,21	4,97	0,26	0,77	3,62	2,46
4,72	1,50	3,10	2,08	3,71	4,05	0,77	4,72	3,69	3,95
2,99	2,55	3,13	4,11	2,57	3,96	4,78	3,77	4,30	0,75
2,89	0,07	2,99	3,59	0,98	1,06	2,19	3,73	2,84	1,05

На рис. 42 приведено три графика:

- гистограмма распределения;
- графики стандартного закона, наиболее близкого по критерию Колмогорова к полученной выборке данных (функция и плотность распределения);
- графики теоретического закона (функция и плотность распределения).

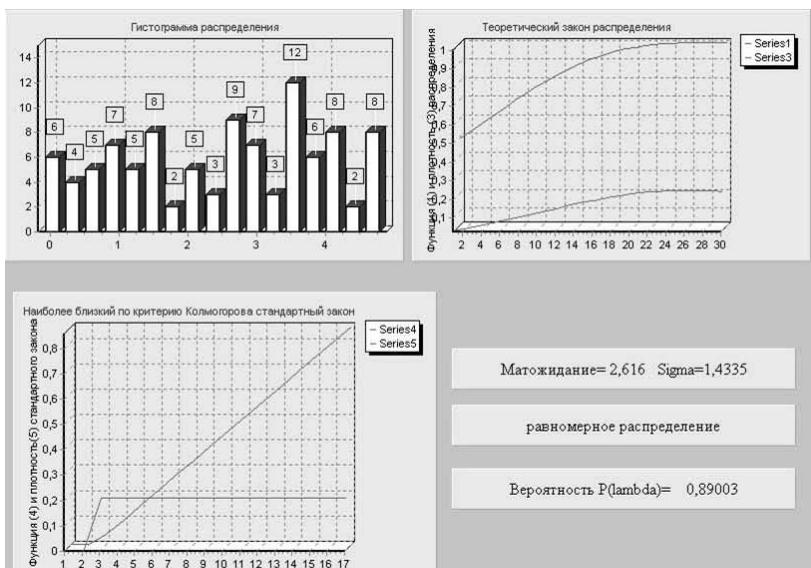


Рис. 42. Результаты обработки времен обнаружения объекта

Series1 – график функции; Series3 – плотность распределения; Series4 – функция стандартного распределения; Series5 – плотность стандартного распределения

### 3.2. Формирование перечня системных связей СТС

В разд. 1.1 было приведено понятие связи и дан перечень возможных видов связей. На основе этого перечня на рис.43 приведены основные характеристики системных связей СТС.



Рис. 43. Перечень основных характеристик связей СТС

В настоящее время основными связями являются информационные связи и потоки.

**Информационные связи и потоки.** Информационные связи и потоки представляют собой необходимую информацию, предварительно накопленную в системе или банке данных, информацию, поступающую при опросе приборов и датчиков, информацию обмена между подсистемами и блоками СТС (рис. 44). Банк данных представляет собой организованный и хорошо структурированный формат, и пользователь системы имеет доступ к этой информации, иными словами, к данным, характеризуемым определенными признаками.



Рис. 44. Информационные связи СТС

При составлении банка данных наибольшее значение имеют следующие позиции: интерфейс пользователя (язык запросов), обмен данных с другими системами (совместимость), обслуживание банка данных.

Под БЗ в общем случае понимается – знания, охватывающие всю совокупность сведений и способностей, которые используются индивидуумом для решения задач, а также позволяют интерпретировать информацию [55].

В работе [56] приведено такое определение БЗ: **База знаний** – knowledge base – семантическая модель, предназначенная для представления в компьютере знаний, накопленных человеком в определенной предметной области. Является основной составной частью интеллектуальных и экспертных систем.

При всей необходимости и важности БЗ определенного понимания и места баз знаний в процессе исследования и проектирования продукции нет [57].

«База знаний — множество именованных единиц (знаний), обладающих внутренней структурой и связанных между собой системой различных отношений, а также набором средств для доступа к ним, записи новых знаний и проведения специальных операций над ними». На рис. 45 приведен пример наполнения БЗ.

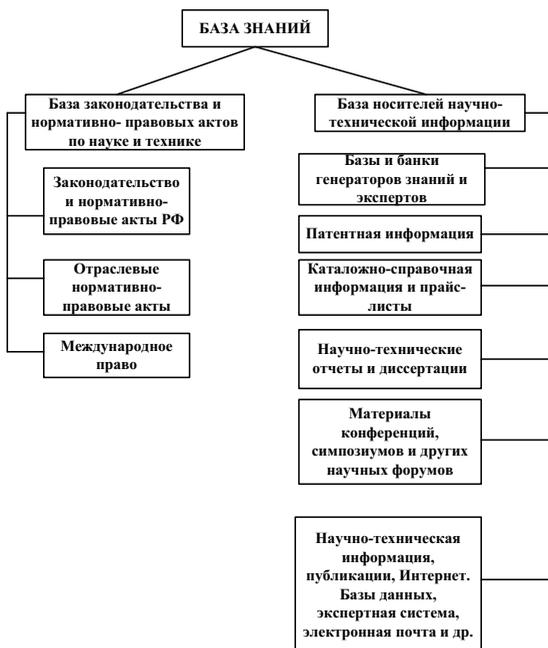


Рис. 45. Наполнение БЗ

Потоки информации характеризуются следующими основными параметрами:  $t$  – время получения информации;  $t_z$  – время задержки;  $V$  – объем информации в битах (байтах); протокол обмена информации (например, RS 232).

Информационные потоки делятся на внутренние и внешние. Внутренние потоки и связи - это потоки и связи между блоками и подсистемами комплекса, а также управляющие потоки с вычислительной системы (ПЭВМ, процессор). Внешние потоки и связи - это передача информации по радиоканалам связи, передача видеoinформации; передача управляющих сигналов и команд.

На рис. 46 приведены информационные показатели СТС, на рис. 47 – оценка качества информационного обеспечения СТС.



Рис. 46. Информационные показатели СТС



Рис. 47. Оценка качества информационного обеспечения СТС

Основным требованием к информационным потокам является помехозащищенность от различных видов помех (искусственных или естественных).

В работе [58] предложено для систем управления ввести следующее

правило. Если скорость поступления информации в СТС характеризовать величиной  $\lambda_i = dI / dt$ , где  $I$  – объем информации, а скорость переработки информации состоянием в управляющее воздействие  $\mu_i = dy / dt$ , где  $y$  – объем обработанной информации для выработки управляющего воздействия, то:

— при  $\lambda_i - \mu_i = 0$  — система управления выполняет свои функции на пределе своих возможностей;

— при  $\lambda_i - \mu_i > 0$  — система управления не в полном объеме выполняет свои функции;

— при  $\lambda_i - \mu_i < 0$  — система управления работает в облегченном режиме.

Параметры потока информации, поступающей в СТС, в общем случае имеют случайный характер, закон распределения времени ее поступления близок к пуассоновскому (рис. 48) [51]

$$p(k) \equiv \mathbb{P}(Y = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$$

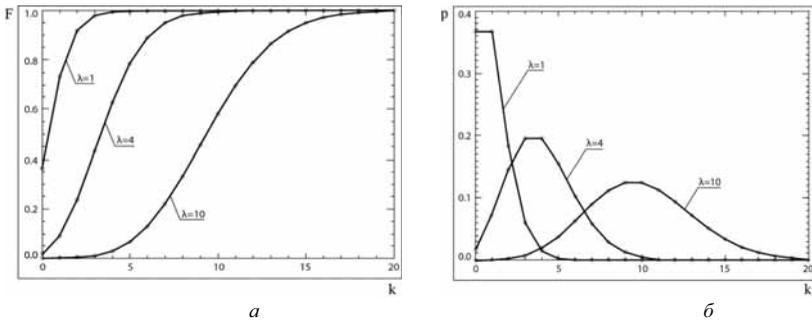


Рис. 48. Распределение Пуассона:

$a$  – функция распределения,  $b$  – функция вероятности

К информационным показателям СТС относятся объем информации, точность информации, надежность информации, стоимость информации, ответственность за качество информации, характеристики входящего в СТС и исходящего из нее потоков (рис. 46).

Качество информационного обеспечения системы определяется следующими факторами: количеством и качеством источников информации,

возможностью системы приема информации и помехозащищенностью системы (рис. 47).

Если СТС имеет  $n_i$  каналов приема информации и по каждому каналу может поступать поток информации с интенсивностью  $\lambda_{ni}$  и полезностью  $\delta$ , то органом управления принимается информация объемом  $\theta_{ni}$ . В то же время для реализации всех управленческих функций необходим объем информации, равный  $\theta_{ni}$ .

Критерием качества информационного обеспечения принимается вероятность события, состоящего в том, что объем необходимой информации, поступившей в орган управления, будет не менее потребного, т.е.  $\theta_{ni} \geq \theta_{ni}$ .

При показательном законе времени поступления информации значение этой вероятности определяется следующим образом:

$$P_{ki} = \exp\{-\delta(1 - K_{из})K_{ср}K_x\theta_{ni} / \theta_{ni}\},$$

где  $\delta$  – показатель, характеризующий степень полезности информации, поступающей в орган управления;

$K_{из}$  – показатель, характеризующий скрытность системы;

$K_{ср}$  – показатель, характеризующий скрытность системы;

$K_x$  – показатель, характеризующий качество хранения и передачи информации объекту управления.

### 3.3. Декомпозиция СТС

В главе 1 были даны общие определения по декомпозиции СТС. Рассмотрим конкретные особенности задачи декомпозиции СТС.

**Глубина декомпозиции.** Если при декомпозиции выясняется, что модель начинает описывать внутренний алгоритм функционирования элемента вместо закона его функционирования в виде «чёрного ящика», то в этом случае произошло изменение уровня абстракции. Это означает выход за пределы цели исследования системы и, следовательно, вызывает прекращение декомпозиции.

Типичной является декомпозиция модели на глубину 5-6 уровней. На такую глубину декомпозируется обычно одна из подсистем. Функции, которые требуют такого уровня детализации, часто очень важны, и их детальное описание дает ключ к основам работы всей системы.

В общей теории систем доказано, что большинство систем могут быть

декомпозированы на базовые представления подсистем. К ним относят: последовательное (каскадное) соединение элементов, параллельное соединение элементов, соединение с помощью обратной связи (рис.49).

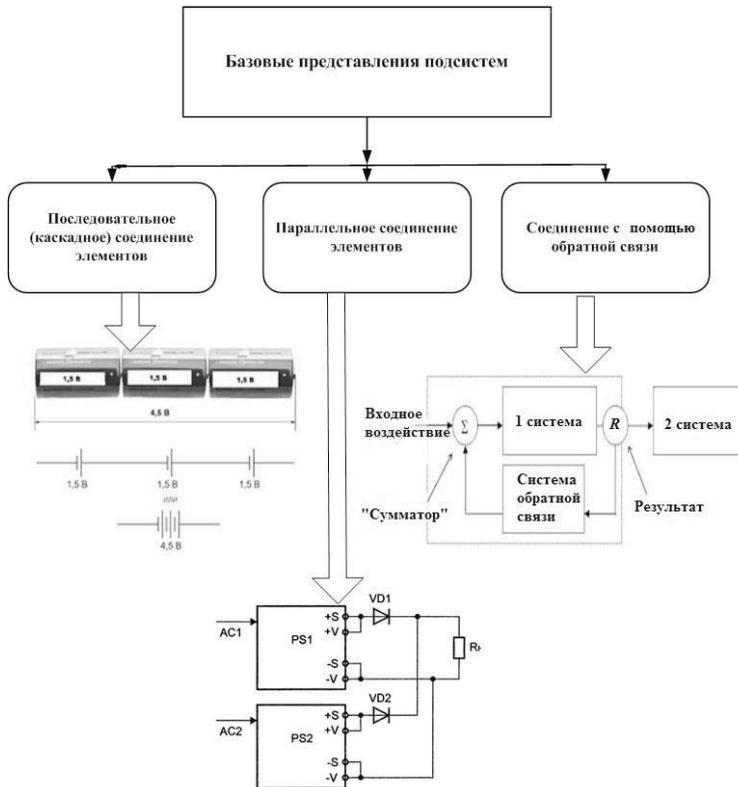


Рис. 49. Базовые представления СТС

Проблема проведения декомпозиции состоит в том, что в сложных системах отсутствует однозначное соответствие между законом функционирования подсистем и алгоритмом, его реализующим. Поэтому осуществляется формирование нескольких вариантов (или одного варианта, если система отображена в виде иерархической структуры) декомпозиции системы.

Наиболее часто применяемые стратегии декомпозиции:

- **функциональная декомпозиция.** Декомпозиция базируется на анализе функций системы. Основанием разбиения на функциональные подсистемы служит общность функций, выполняемых группами элементов;
- декомпозиция по **жизненному циклу.** Признак выделения подсистем – изменение закона функционирования подсистем на разных этапах цикла существования системы «от рождения до гибели». Для жизненного цикла управления организационно-экономической системы выделяют этапы планирования, инициирования, координации, контроля, регулирования. Для информационных систем разделяют этапы обработки информации: регистрацию, сбор, передачу, обработку, отображение, хранение, защиту, уничтожение. На рис. 50 приведен пример функциональной связи жизненного цикла изделий новой техники;
- декомпозиция по **физическому процессу.** Признак выделения подсистем – шаги выполнения алгоритма функционирования подсистемы, стадии смены состояний. Хотя эта стратегия полезна при описании существующих процессов, результатом её часто может стать слишком последовательное описание системы, которое не будет в полной мере учитывать ограничения, диктуемые функциями друг другу. При этом может оказаться скрытой последовательность управления. Применять эту стратегию следует, только если целью модели является описание физического процесса как такового;
- декомпозиция по **подсистемам** (структурная декомпозиция). Признак выделения подсистем – сильная связь между элементами по одному из типов отношений (связей), существующих в системе (информационных, логических, иерархических, энергетических и т. п.). Силу связи по информации можно оценить коэффициентом информационной взаимосвязи подсистем  $k = N/N_0$ , где  $N$  – количество взаимопользуемых информационных массивов в подсистемах,  $N_0$  – общее количество информационных массивов. Для описания всей системы должна быть построена составная модель, объединяющая все отдельные модели;

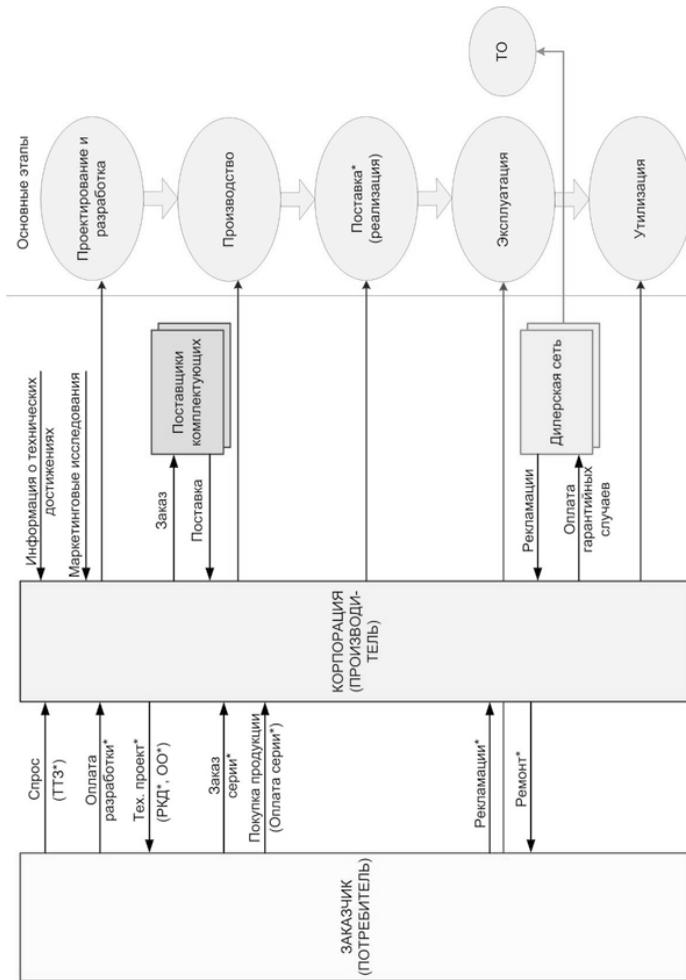


Рис. 50. Функциональная схема жизненного цикла изделий новой техники

- декомпозиция по *входам* для организационно-экономических систем. Признак выделения подсистем: источник воздействия на систему, это может быть вышестоящая или нижестоящая система, а также существенная среда;
- декомпозиция по *типам ресурсов*, потребляемых системой. Формальный перечень типов ресурсов состоит из энергии, материи, времени и информации (для социальных систем добавляются кадры и финансы);
- декомпозиция по *конечным продуктам* системы. Основанием могут служить различные виды продукта, производимые системой;
- декомпозиция *деятельности человека*. Выделяется субъект деятельности, объект, на который направлена деятельность, средства, используемые в процессе деятельности, окружающая среда, все возможные связи между ними.

Обычно декомпозиция осуществляется по нескольким основаниям, порядок их выбора зависит от квалификации и предпочтений системного аналитика.

**Структурная декомпозиция продукта (Product Breakdown Structure)** – иерархическая структуризация продукта проекта, ориентированная на основные результаты проекта. Каждый нижестоящий уровень структуры представляет собой детализацию элемента высшего уровня проекта. Элементом структурной декомпозиции продукта является структурный элемент продукта. Обычно структурная декомпозиция продукта соотносится со структурной декомпозицией предметной области проекта.

**Алгоритмическая декомпозиция** – осуществление структурного проектирования по методу «сверху-вниз»; алгоритм задачи разбивается на отдельные модули. Каждый модуль системы реализует один из алгоритмов общей задачи. Принципы алгоритмической декомпозиции поддерживаются языком Турбо-Паскаль, являющимся хорошим инструментом структурного программирования. Наряду с декомпозицией по алгоритмам существует декомпозиция по объектам или объектно-ориентированная декомпозиция, когда в качестве критерия выбирается принадлежность элементов к различным абстракциям, т.е. идентифицируются объекты различного типа. Иллюстрацией объекта может служить запись, список полей которой объединяет не только данные, но также методы обработки этих данных.

При разработке сложной системы [59] рекомендуется принимать стратегию декомпозиции «и по алгоритмам, и по объектам». Опыт показывает, что сначала полезнее применить объектно-ориентированный подход, который позволит лучше понять структуру программной системы. Кроме того, существует возможность использовать общие методы для различных объектов и, следовательно, создавать системы меньшего

размера. Алгоритмическая декомпозиция проиллюстрирует связи между различными функциональными элементами системы. Объектно-ориентированное программирование (ООП) определяется как методология программирования, основанная на представлении программы в виде совокупности объектов, каждый из которых является реализацией определенного класса. Можно построить новые объекты, наследующие свойства (данные и методы их обработки) предшественника, т.е. создать иерархию объектов. Кроме того один и тот же метод (процедура или функция) может быть использован различными объектами, связанными наследованием. Это свойство объектов называют полиморфизмом. Таким образом, объектно-ориентированное программирование базируется на трех основных понятиях:

- объединение данных и методов в объекте,
- наследование,
- полиморфизм.

Многие специалисты считают, что объектно-ориентированное программирование, появившееся в начале 80-х годов, будет занимать такое же место, которое занимало структурное программирование в 1970-х годах, поскольку при разработке сложных программ можно расширять область их применения, не переделывая программу, а добавляя в нее новые уровни иерархии. Не все языки программирования являются объектно-ориентированными. Известны три условия принадлежности языка к группе объектно-ориентированных языков:

- имеется поддержка объектов в виде абстракций данных;
- объекты относятся к соответствующим типам (классам);
- типы (классы) могут наследовать атрибуты от ранее определенных типов (классов)
  - родителей; под атрибутами понимают структуру данных и их поведение, т.е. методы обработки.

Однако затруднительно сконструировать сложную систему одновременно двумя способами, тем более что эти способы, по сути, ортогональны. Необходимо разделение системы либо по алгоритмам, либо по объектам, а затем, используя полученную структуру, попытаться рассмотреть проблему с другой точки зрения. Объектная декомпозиция имеет несколько достаточно важных преимуществ перед алгоритмической декомпозицией:

- объектная декомпозиция уменьшает размер программных систем за счёт повторного использования общих механизмов, что приводит к существенной экономии выразительных средств;

- объектно-ориентированные системы более гибкие и проще эволюционируют со временем, потому что их схемы базируются на устойчивых промежуточных формах;
- объектная декомпозиция существенно снижает риск при создании сложной программной системы, так как она развивается из меньших систем, в которых мы уже уверены;
- объектная декомпозиция помогает разобраться в сложной программной системе, предлагая нам разумные решения относительно выбора подпространства большого пространства состояний.

Иерархию задач можно изобразить в виде дерева (рис. 51).

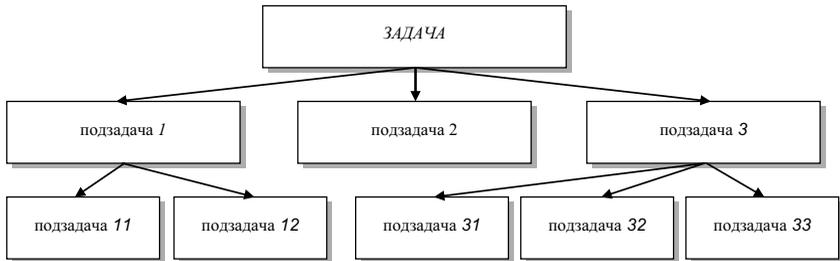


Рис. 51. Иерархия задач

Любая задача может быть сформулирована как функция преобразования исходных данных в выходные данные,  $f(X)=Y$ . Как исходные данные, так и функция могут быть достаточно сложными. Например,  $X$  – число, вектор, текст на каком-либо языке, база данных, рисунок, мультимедиа информация. То же можно сказать и о выходных данных. Функция может быть суммой чисел, тригонометрической функцией, корнем уравнения, переводом текста с русского на английский, раскраской полутонового рисунка, созданием спецэффектов в видеoinформации и т.д.

Представляя задачу на подзадачи, можно:

- разбивать исходные и выходные данные на части или упрощать их; под разбиением понимаем разделение структуры данных на части, например, разделение вектора из десяти компонент на два вектора по пять компонент или разделение текста на предложения; под упрощением понимаем такие ситуации, когда, например  $X$  –

- число и его нельзя разбить на части, но его можно разложить, скажем, в сумму  $X = X_1 + X_2$ , так, что результаты  $f(X_1), f(X_2)$  отыскиваются проще, чем  $f(X)$ ;
- производить декомпозицию функции, то есть превращать ее в суперпозицию более простых,  $f(X) = g(h(s(X)))$  или  $f(X) = g(X, h(X), s(X))$ .

**Пример 3.3.** Приведем пример декомпозиции на примере производства кабелей.

Ранее технологический процесс (ТП) управлялся одной системой. При этом это были несложные процессы управления с одномерными объектами. После усложнения ТП становились многомерными, но системы управления строились как централизованные, с использованием одной ЭВМ [60]. В работе [60] приводятся практические примеры реализации методов декомпозиции и децентрализации в СТС.

Декомпозиция – это научный метод исследования сложных ТП (объектов, целей), заменяемых исследованием отдельных элементов. Под декомпозицией будем понимать разделение (расщепление) сложной задачи (цели, объекта, ТП) на более простые элементы.

На рис. 52 приведена технологическая схема наложения алюминиевой защитной оболочки на гидравлическом прессе типа П 6043.

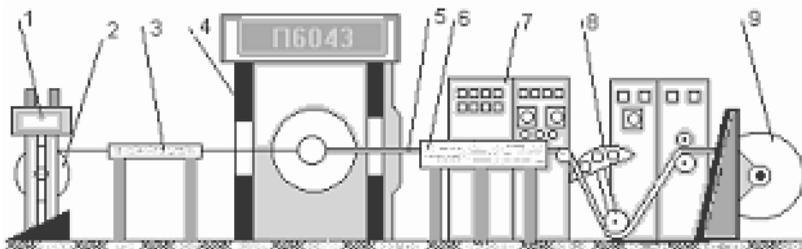


Рис. 52. Технологическая схема процесса:  
 1 – отдающее устройство; 2 – барабан с заготовкой кабеля; 3 – направляющий стол для исключения провисания кабеля; 4 - собственно гидравлический пресс; 5 – кабель в наложенной оболочке; 6 – ванна для охлаждения; 7 – система управления; 8 – компенсатор; 9 – приемный барабан с изготовленным кабелем

На рис. 53 приведена функциональная схема декомпозиции объекта-пресса для наложения алюминиевых оболочек методом выдавливания.

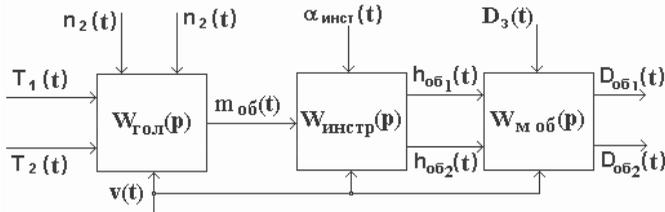


Рис. 53. Функциональная схема декомпозиции объекта – пресса для наложения алюминиевых оболочек методом выдавливания

На рис. 53 обозначено  $W_{Гол}(p)$ ,  $W_{инстр}(p)$ ,  $W_{М об}(p)$  - передаточные функции соответственно головки пресса, инструмента (дорн-матрица) и механизма образования диаметра оболочки;  $m_{об}(t)$  - масса выдавленного алюминия оболочки;  $h_{об1}(t)$ ,  $h_{об2}(t)$  - толщины оболочки кабеля с правой и левой стороны;  $D_3(t)$ ,  $D_{об1}(t)$ ,  $D_{об2}(t)$  - диаметры заготовки кабеля и диаметры оболочки кабеля с разных сторон;  $\alpha_{инст}(t)$  - угол управления ключом инструмента перемещения дорна.

В работе [60] отмечено, что предлагаемые схемы декомпозиции позволили уменьшить в среднем на 18-20% стоимость проектов, на 23-29% время наладки и обслуживания в зависимости от сложности объектов ТП.

### 3.4. Разбиение общего критерия эффективности по подсистемам

В разд. 1.9 было введено представление общего функционала в виде составляющих по блокам структуры комплекса. Здесь важным является то, что все полученные частные критерии будут удовлетворять общему критерию эффективности и, следовательно, после оптимизации подсистем может быть сформирована таблица оптимальных вариантов подсистем, из которых затем формируется структура СТС. Далее приводятся примеры, поясняющие процедуру разбиения общего функционала в виде составляющих.

**Пример 3.4.** В работе [58] приведено выражение для вероятности нахождения объекта управления в интегральной области управления (для нормального закона):

$$P_0 = 1 - \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[ 1 + \Phi \left( \frac{D_i - D_{сп.i}}{\sigma_{D_i}} \right) \right] \right\},$$

$n$  - количество элементов системы, с которых может осуществляться воздействие в данной точке пространства;

$D_i$  – максимальное удаление, на котором может находиться объект управления от  $i$ -го элемента системы;

$D_{cp,i}$  – среднее удаление границы поля от  $i$ -го элемента системы;

$\sigma_{Di}$  – среднее квадратическое отклонение ошибки определения этого удаления.

В соответствии с формулами, приведенными в разд. 1.9, введем следующие обозначения:

$$\Psi[K\{\alpha\}] = \Phi\left(\frac{D_i - D_{cp,i}}{\sigma_{Di}}\right); \quad K(\{\alpha\}) = \frac{D_i - D_{cp,i}}{\sigma_{Di}}; \quad \alpha \equiv D_i;$$

тогда соответствующие производные равны:

$$\frac{\partial W}{\partial \Psi} = \frac{n}{2} > 0; \quad \frac{\partial \Psi}{\partial K} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{D_i - D_{cp,i}}{\sigma_{Di}}\right)^2\right] > 0.$$

Следовательно,  $\alpha = D_i$  – показатель для случая выполнения задачи Э при заданном числе систем. Обобщенный показатель  $K(\alpha)$  наилучшего варианта является максимальным, т.е.

$$K(\alpha) = \max.$$

**Пример 3.5.** Вероятность события, состоящего в том, что фактическое время выполнения работы (мероприятия) –  $t_{\Sigma}$  будет не более заданного  $t_3$  (для нормального закона).

$$P_t(t_{\Sigma} \leq t_3) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \Phi\left(\frac{t_3 - t_{\Sigma}}{\sigma_{t_{\Sigma}}}\right) \right],$$

где  $\sigma_{\Sigma}$  – СКО суммарной ошибки фактического и заданного времени выполнения задачи (мероприятия)[58].

Введем обозначения

$$\Psi[K(\{\alpha\})] = \Phi\left(\frac{t_3 - t_{\Sigma}}{\sigma_{t_{\Sigma}}}\right); \quad K(\{\alpha\}) = t_{\Sigma};$$

После преобразований получим:

$$\frac{\partial W}{\partial \Psi} = \frac{1}{2}; \quad \frac{\partial \Psi}{\partial K} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(t_3 - t_{\Sigma})^2}{\sigma_{t_{\Sigma}}^2}\right] \left(-\frac{1}{\sigma_{t_{\Sigma}}}\right) < 0.$$

Следовательно, показатель эффективности – число систем, потребное для решения задачи с заданными условиями:  $K(\{\alpha\}) = t_{\Sigma} = \min$ .

**Пример 3.6.** Критерием качества информационного обеспечения принимается вероятность события, состоящего в том, что объем необходимой информации, поступившей в орган управления, будет не менее потребного, т.е.  $\theta_{и} > \theta_{п}$ .

При показательном законе времени поступления информации значение этой

вероятности определяется так:

$$P_i = \exp\{-\delta(1 - K_{пз})K_{скр}K_x\theta_n/\theta_n\},$$

где  $\delta$  – показатель, характеризующий степень полезности информации, поступающей в орган управления;

$K_{пз}$  - показатель, характеризующий помехозащищенность системы;

$K_{скр}$  - показатель, характеризующий скрытность системы;

$K_x$  - показатель, характеризующий качество хранения и передачи информации объекту управления.

Если выбрать в качестве функций:

$$\Psi[K(\{\alpha\})] = 1 - K_{пз}; K(\{\alpha\}) = K_{пз};$$

и провести преобразования, получим:

$$\frac{\partial W}{\partial \Psi} < 0; \frac{\partial \Psi}{\partial K} < 0,$$

т.е. условие  $K(\{\alpha\}_1) < K(\{\alpha\}_2)$  не выполняется. В этом случае необходимо подбирать другой критерий оптимальности подсистемы.

**Пример 3.7.** Из работы [6] известно, что уравнение прибыли имеет вид:

$$Z = [(P-k) - C]Q - F - M = \Psi Q - \varphi,$$

где  $P$  - чистая прибыль,  $k$  - скидка на транспортные расходы,  $C$  - переменные затраты, не связанные с маркетингом и зависящие от количества товара  $Q$ ,  $Q$  - объем сбыта в натуральном выражении,  $F$  - постоянные затраты, не связанные с маркетингом и не зависящие от количества товара,  $M$  - маркетинговые затраты,  $M = A + D$ ,  $A$  - затраты на рекламу,  $D$  - затраты на реализацию товара. В маркетинговых исследованиях величину  $(P - k) - C \Rightarrow$  называют удельной прибылью, а умноженную на  $Q \Rightarrow$  совокупной валовой прибылью.

В соответствии с методикой, приведенной в разд. 1.9, имеем

$$\partial Z / \partial \Psi = 1 > 0,$$

$$\partial \Psi / \partial C = -Q < 0.$$

Согласно правилу предпочтительности (см. разд. 1.9)  $\max Z$  будет при  $\min C$ .

### 3.5. Методология проектирования СТС

#### *Принципы построения методологии*

Замена громоздких по описанию методов решения проблемы на более простые, но оперативные процедуры оценки СТС методами системного анализа, может быть проведена при введении определенных допущений, таких как:

- все рассматриваемые альтернативные варианты являются равнозначными с точки зрения выполнения целевой задачи;
- результат оценки вариантов имеет относительные, а не абсолютное значение;
- результаты оценок являются информационной базой для анализа, обсуждения и принятия решения.

С учетом этих допущений при разработке основ методологии закладываются следующие принципы:

- системность, т.е. учет всех связей процесса создания и эксплуатации образца техники;
- независимость, т.е. результаты экспертной оценки не должны быть коррелированы по ведомственным интересам;
- оперативность, т.е. простота набора исходных данных и расчетов на ПЭВМ;
- достоверность, т.е. точность получаемых результатов должна быть менее 7-8%;
- надежность, т.е. математическое обеспечение и программы моделирования на ПЭВМ должны обеспечивать широкий диапазон оценки исследуемых образцов техники.

Критерий эффективности СТС в общем случае имеет вид:

$$\mathcal{E}_{\text{СТС}} = F_1(\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_5).$$

Здесь  $\mathcal{E}_{\text{СТС}}$  - эффективность выполнения поставленной задачи СТС;  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_5$  - эффективности выполнения этапов СТС.

Сложность применения такого подхода состоит в разбиении общего критерия эффективности выполнения задачи на отдельные составляющие.

Примеры самых простых видов критерия, например,

$$\text{мультикативный } \mathcal{E}_{\text{СТС}} = \prod_{i=1}^5 \mathcal{E}_i ; \quad \text{аддитивный } \mathcal{E}_{\text{СТС}} = \sum_{i=1}^5 \mathcal{E}_i$$

Некоторые СТС, например, могут быть описаны критерием:

$$\mathcal{E}_{\text{СТС}} = P_0 P_{\text{зх}} P_{\text{нав}} P_{\text{поп}} (1 - P_{\text{лс}}),$$

где  $P_0$ ,  $P_{\text{зх}}$ ,  $P_{\text{нав}}$ ,  $P_{\text{поп}}$ ,  $P_{\text{лс}}$  - вероятности обнаружения маяка, его захвата, наведения, попадания и ложного срабатывания [1].

Разложив функцию  $\mathcal{E}_{\text{СТС}}$  в ряд Тейлора при условии независимости величин  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_5$  можно записать [6]

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{СТС}} = \sum_{i=1}^5 F'_i \Delta \mathcal{E}_i$$

где  $F'_i = \partial F_1 / \partial \mathcal{E}_i$ ;  $\Delta \mathcal{E}_i = \mathcal{E}_i - \mathcal{E}_i^{\text{ном}}$ ;  $\Delta \mathcal{E}_{\text{etc}} = \mathcal{E}_{\text{etc}} - \mathcal{E}_{\text{etc}}^{\text{ном}}$ .

При таком представлении функции  $\mathcal{E}_{\text{etc}}$  применимы методы исследований линейных систем, в том числе теория чувствительности.

Из анализа надсистемы формируются 5 основных блоков описания комплекса: от исходного состояния до результатов (рис.39). Формируется БЗ параметров, которая используется для выбранных критериев для оценки эффективности выполнения задачи. Это прямая задача исследований. При задании эффективности решения задачи при выбранных критериях определяется множество параметров, как всей системы, так и отдельных модулей – это обратная задача проектирования.

### ***Реализация метода проектирования СТС***

Исходя из системного подхода, предлагается ввести следующие принципы построения метода:

- автономность - каждый модуль метода (методический, программный) представляет собой самостоятельно функционирующую сущность;
- наращиваемость - возможность изменения и добавления функций сущности без изменения общей структуры системы;
- модернизируемость - легкая и быстрая адаптируемость к различным задачам;
- наследуемость - создание новых сущностей по некоторой совокупности исходных;
- инкапсулируемость - механизм взаимодействия между сущностями, позволяющий им сохранять свою автономность (рис. 37).

Эти принципы были положены в основу реализации метода проектирования СТС. Разрабатываемый метод проектирования и его реализация включают в себя постоянную (ядро) и изменяемую части. Под ядром методологии и системы понимается набор фундаментальных методов, методик, их реализация, не требующая изменений при эксплуатации системы (метод ранжирования, статистическая обработка результатов исследований, механизм наследования и выборка данных и др.) (рис. 54).

При проектировании СТС предполагается использовать весь спектр накопленных знаний. В рамках задачи рассматривается как минимум три уровня: надсистема, система, подсистема, причем при проектировании отдельного модуля в качестве системы - выступает предыдущий уровень, а в качестве надсистемы – собственно проектируемый комплекс.

Изменяемая часть методологии и системы - качественная суть каждого нового

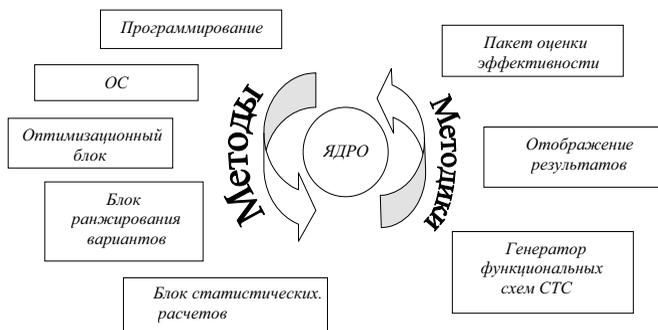
вида СТС - представляет особенности рассматриваемой СТС, например, при решении экономических задач, при проектировании комбинированных систем, гибридных систем.

При этом необходимо правильно понимать основные принципы метода.

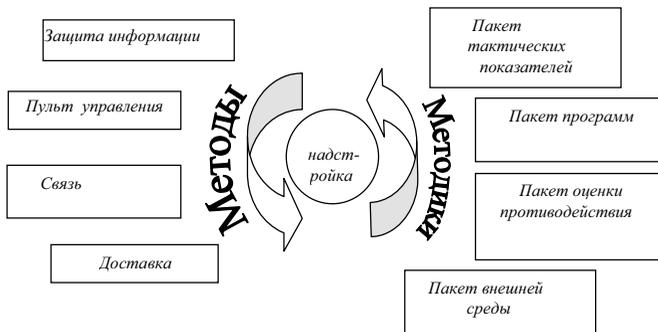
Под *наращиваемостью* будем понимать добавление или изменение сущности. В этом случае структура системы не несет в себе никаких изменений. Под *модеризируемостью* будем называть возможность применения к исследуемой системе различных совокупностей сущностей в зависимости от типа системы. Например, экономические, сложные технические или технологические системы потребуют применения к себе различных подходов к исследованию и проектированию.

Для успешного применения метода предполагается использовать не только имеющиеся, но и перспективные изделия и технологии. Потребуется описание их сущности и функциональности. В любом случае заново проектируемая система будет иметь как наработанные узлы и конструкции, так и свои, уникальные составные части. В упрощении исследований при таком сложном строении и применяется принцип наследования. Причем вводимый в метод проектирования принцип инкапсуляции позволяет взаимодействовать сущностям между собой и сохранить их целостность.

На рис. 54 приведены примерный вид ядра системы и одного из вариантов изменяемой части с реализацией методологии проектирования СТС.



а



б

Рис. 54. Реализация методологии проектирования СТС  
а- ядро системы, б- изменяемая часть

Реализация метода проектирования СТС осуществляется в три этапа:

- неформализованного представления иерархии критериев эффективности, соответствующей выбранной структуре СТС;
- реализации в виде программного кода ядра системы;
- реализации и надстройки на ядро изменяемой части системы, соответствующей особенностям проектируемой СТС.

Применение метода обратных задач к проектированию СТС требует наличия мощных интеллектуальных баз знаний, банков и баз данных по проектируемым изделиям, что возможно лишь при наличии соответствующих хранилищ информации

В любом случае, информацию можно разделить на три большие группы по следующим направлениям:

- существующие изделия и технологии;
- перспективные изделия и технологии, формализованные либо абсолютными характеристиками (результат применения – конкретный продукт с конкретными характеристиками), либо относительными характеристиками (то же самое, но выраженными в процентах от существующего уровня);
- прорывные технологии – трудно формализуемые технологии, результат применения которых не всегда можно выразить натуральными или относительными значениями, эффект от их использования не всегда можно оценить.

Основной задачей банка прорывных технологий является концентрация интеллектуального потенциала отрасли и приемы его использования.

Из литературы известно, что высокие технологии это передовые наукоемкие технические решения, подтвердившие свою высокую эффективность (по отношению к достигнутому уровню действующих аналогов) результатами успешных испытаний.

Прорывные технологии – это научно-технические решения и достижения кардинально меняющие процесс проектирования, создания и внедрения принципиально новых видов СТС.

### ***Принципы построения банка прорывных высокотехнологических решений***

Для решения поставленной проблемы предлагается создавать два типа банка технологий:

- банк технологий на традиционных принципах (готовые и перспективные решения);
- банк технологий на новых принципах (готовые и перспективные решения).

Основными принципами построения отраслевого банка прорывных технологий должны быть:

- соответствие целям и задачам стоящим перед предприятиями отрасли;
- обеспечение повышения эффективности выполнения поставленной задачи не менее чем в 3-5 раз;
- обеспечение ограничений по стоимости, экологии и ресурсам;
- обеспечение многоуровневости описания, как изделий, так и технологий (существующих и перспективных);
- реализация принципов разделения ресурсов (на конструкторскую, исследовательскую, информационную, экономическую, режимную);
- реализация объектно-ориентированных хранилищ информации;
- совместимость с другими аналогичными проектами смежных отраслей;
- обеспечение достоверности и доскональности информации о параметрах, принципах и методах, используемых в технологии.

Выбранные принципы построения отраслевого банка прорывных высокотехнологических решений позволяют создать перечень существующих и перспективных научно-технических решений, который позволит повысить эффективность создания новых образцов техники.

При создании банка прорывных технологий должна обеспечиваться иерархичность

построения информации в соответствии со структурой отрасли и тематикой отдельных предприятий (рис.55).

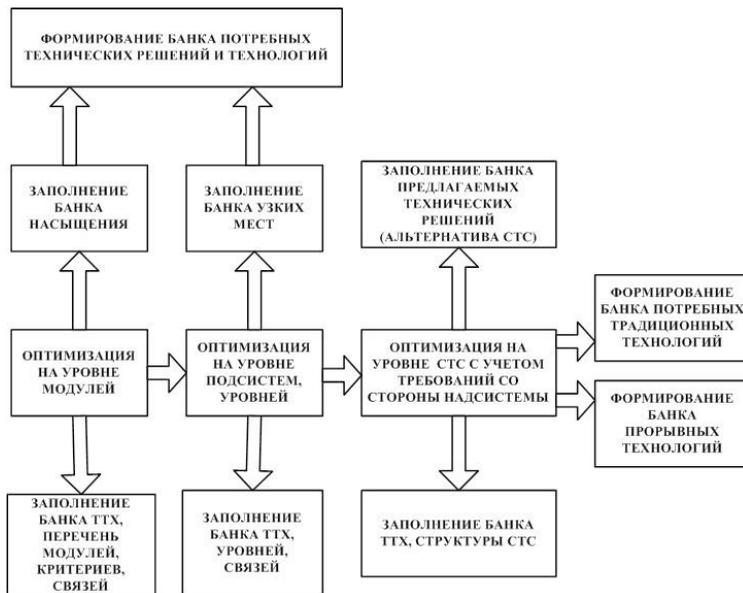


Рис. 55. Схема формирования банка прорывных технологий

В качестве примера элементов банка прорывных технологий общего назначения могут послужить следующие:

- создание высокоэффективных способов получения тепла для отопления зданий;
- создание тепловых насосов для отопления коттеджей и зданий до 500 м<sup>2</sup> в любом месте РФ;
- создание командного блока управления небольшими летательными аппаратами;
- создание долговременно-живущих самонаводящихся парашютных систем и автоматических парапланнанных систем..

#### **Перечень задач управления**

Решение целевой задачи, стоящей перед СТС, особенно в условиях противодействия (естественного, искусственного), возможно при наличии системы управления: автоматической или автоматизированной. К автоматизированным системам относятся телеуправляемые аппараты. В состав автоматизированных систем входит ЛПП

(или оператор управления), обладающий неформальным мышлением и опытом работы с системами управления. ЛПП являются источниками первичной информации и потребителями результатов её обработки [32, 33].

Автоматизированные системы управления являются одним из направлений применения информационных систем. Совокупность средств информационной техники и персонала, объединенных для достижения целей управления, образует информационную систему (ИС). На рис. 56 приведены задачи управления СТС, на рис. 57 – представление СТС как объекта управления, неважно автоматического (автономного) или автоматизированного (с помощью оператора).



Рис. 56. Перечень задач управления СТС

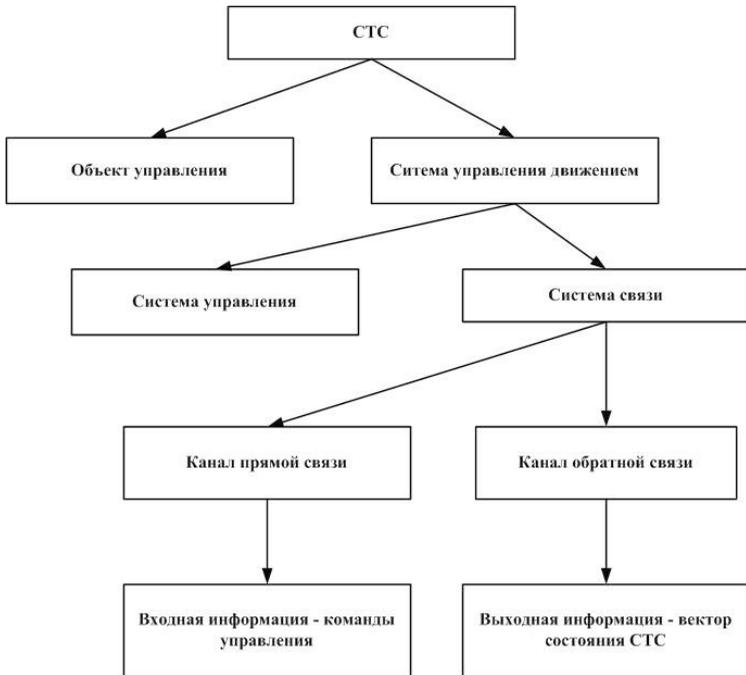


Рис. 57. СТС как объект управления

Понятие «автоматизированное управление» СТС более широкое понятие, чем просто телеуправление (с помощью кабеля). В перспективе, это может быть акустическое управление, управление с помощью маяков и т.п. Общей целью автоматизации управления СТС является повышение эффективности использования возможностей объекта управления, которые обеспечивают направления, приведенные на рис. 58.



Рис. 58. Направления повышения эффективности управления СТС

Необходимость в автоматическом (автономном) и автоматизированном управлении обусловлена резким усложнением процессов управления и носит объективный характер. Создание ИС и информационных технологий резко повышает эффективность использования различных средств для решения единой задачи. Будучи наиболее эффективным, этот путь совершенствования управления является вместе с тем и наиболее сложным. На рис. 59 приведены основные функции управления СТС при выполнении ею заданной целевой задачи.

#### **Основные функции СУ СТС**

Под внешней системой управления понимаются: для автоматизированных систем – пункт расположения ЛПР (оператора), для автоматических (автономных) – команды с внешнего пункта управления по изменению траектории движения СТС.

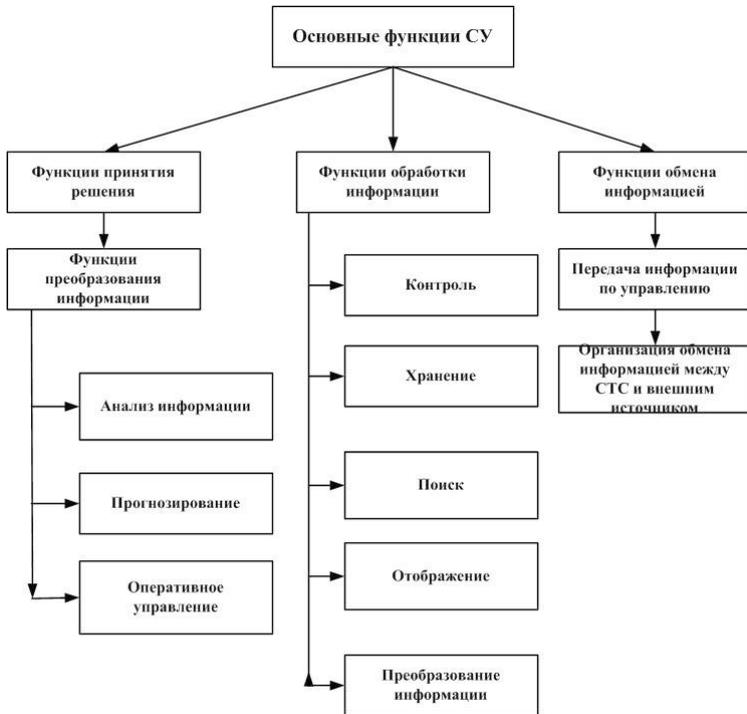


Рис. 59. Основные группы функций СУ СТС

### ***Моделирование функционирования СТС***

При проектировании СТС важное значение занимает моделирование, в том числе математическое, функционирования как всей СТС в целом, так и отдельных её подсистем и элементов. На рис. 60 приведена классификация видов моделирования, которая позволяет исследователю выбрать оптимальные виды моделирования СТС. Первичным видом моделирования СТС является математическое моделирование, которое в большой степени зависит от опыта, интуиции и других интеллектуальных качеств проектировщика. На рис. 61 приведены принципы построения математической модели.

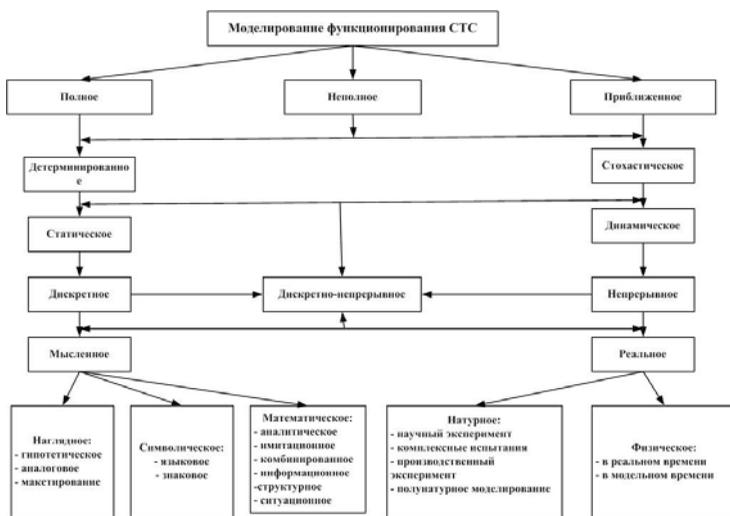


Рис. 60. Классификация видов моделирования

Модель должна строиться для решения определенного класса задач или конкретной задачи исследования СТС. Попытки создания универсальной модели, нацеленной на решение большого числа разнообразных задач, приводит к такому усложнению, что она оказывается практически непригодной. Создание такой конкретной модели связано с принципами адекватности – до тех пор, пока не решен вопрос, правильно ли отображает модель исследуемую систему, ценность модели незначительна.

Практическими рекомендациями для уменьшения сложности моделей являются:

- изменение числа переменных;
- изменение природы переменных параметров (постоянные, непрерывные);
- изменение функциональной зависимости между переменными (линейная, непрерывная);
- изменение ограничений (добавление, исключение или модернизация);
- ограничение точности модели.

Общим для всех моделей, построенных на основе системного анализа, является формирование структуры СТС (несколько альтернативных вариантов), выбор наилучшего варианта, осуществляемого путем решения задач декомпозиции, анализа исследуемой системы и синтеза системы.

### ***Принципы построения математической модели функционирования СТС***

При проектировании СТС следует учитывать принципы системного анализа, приведенные в табл. 29.

**Таблица 29. Принципы системного анализа**

Принцип	Пояснение
Конечная цель	Это абсолютный приоритет конечной (глобальной) цели.
Измерение	Система представляется как часть более общей, и оценку внешних свойств исследуемой системы надо проводить относительно целей и задач суперсистемы
Эквифинальность	Это форма устойчивости системы по отношению к начальным и граничным условиям
Единство	Это совместное рассмотрение системы как целого и как совокупности частей (элементов)
Связность	Выявление связей между элементами и выявление связей с внешней средой (учет внешней среды)
Модульное построение	Рассмотрение системы как совокупности модулей
Иерархия	Введение иерархии частей и их ранжирование для упрощения разработки системы
Функциональность	Совместное рассмотрение структуры и функции с приоритетом функции над структурой. Добавление новой функции системы требует пересмотра структуры. Так как функции составляют процессы, то целесообразно рассматривать отдельно процессы, функции, структуры. В свою очередь, процессы сводятся к анализу потоков различных видов: материальный поток, поток энергии, поток информации, смена состояний. Тогда структура -это множество ограничений на потоки в пространстве и во времени
Развитие (историчности, открытости)	Учет изменчивости системы, ее способности к развитию, адаптации, расширению, замене частей, накоплению информации
Децентрализм	Степень централизации должна быть минимальной, обеспечивающей выполнение поставленной цели. Недостаток децентрализованного управления – увеличение времени адаптации системы. Недостаток централизованного управления – сложность управления из-за огромного потока информации, подлежащей переработке в старшей системе управления.
Неопределённость	Учет неопределённости и случайностей в системе. Можно иметь дело с системой, в которой структура, функционирование или внешние воздействия не полностью определены



Рис. 61. Принципы построения математической модели

### 3.6. Формирование технического облика СТС

Общий подход к проектированию СТС можно представить как цикл, приведенный на рис. 62. Из рассмотрения рисунка следует, что на первом этапе рассматривается вариант СТС, ТО которого не удовлетворяет усложненным требованиям целевой задачи. При реализации задач декомпозиция, анализа и синтеза системы полезно иметь в виду перечень задач, которые входят в состав этих понятий (рис. 63). Этап синтеза представлен на рис. 64.

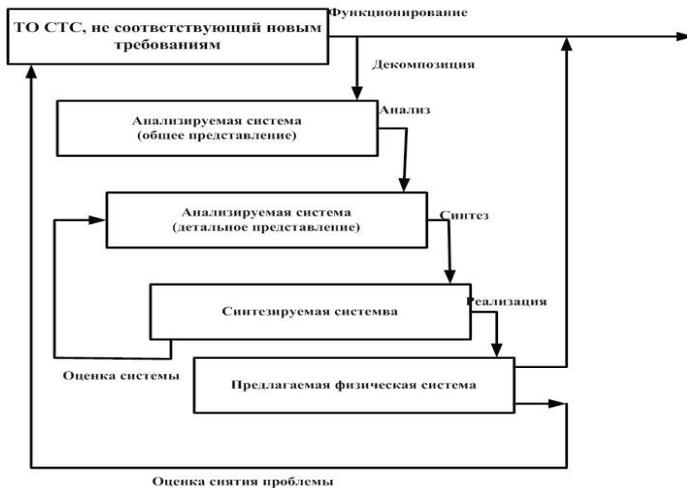


Рис. 62. Общий подход к проектированию СТС

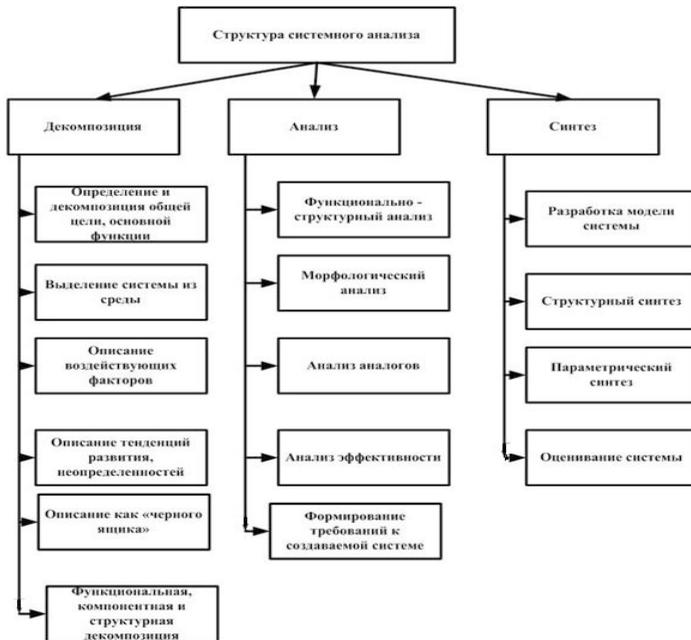


Рис. 63. Перечень функций системного анализа

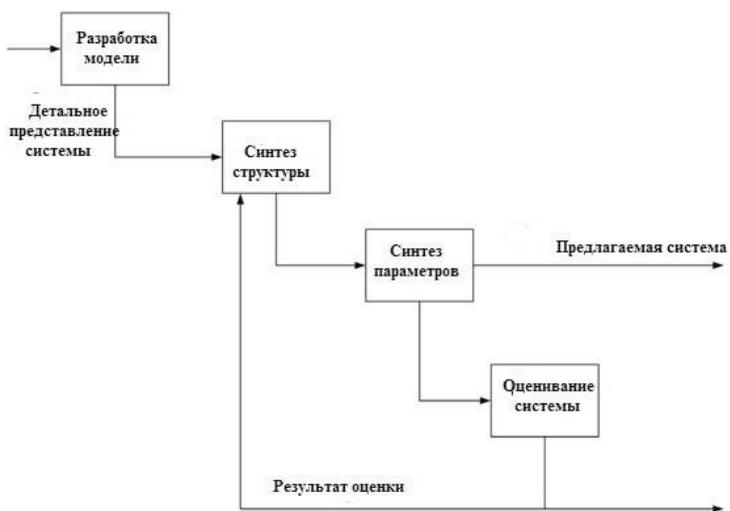


Рис. 64. Упрощенная функциональная схема этапа синтеза системы

### *Этапы оценки СТС*

На рис. 65 приведена блок-схема общего представления СТС, на рис. 66 – блок-схема формирования ТО СТС.

Завершением процесса проектирования СТС является проведение оценки эффективности. На рис. 67 приведены этапы оценивания системы (подсистем, элементов). В табл. 30 приведены наиболее существенные свойства систем с управлением. Наилучшим достижением при проектировании СТС является создание самоорганизующейся системы.

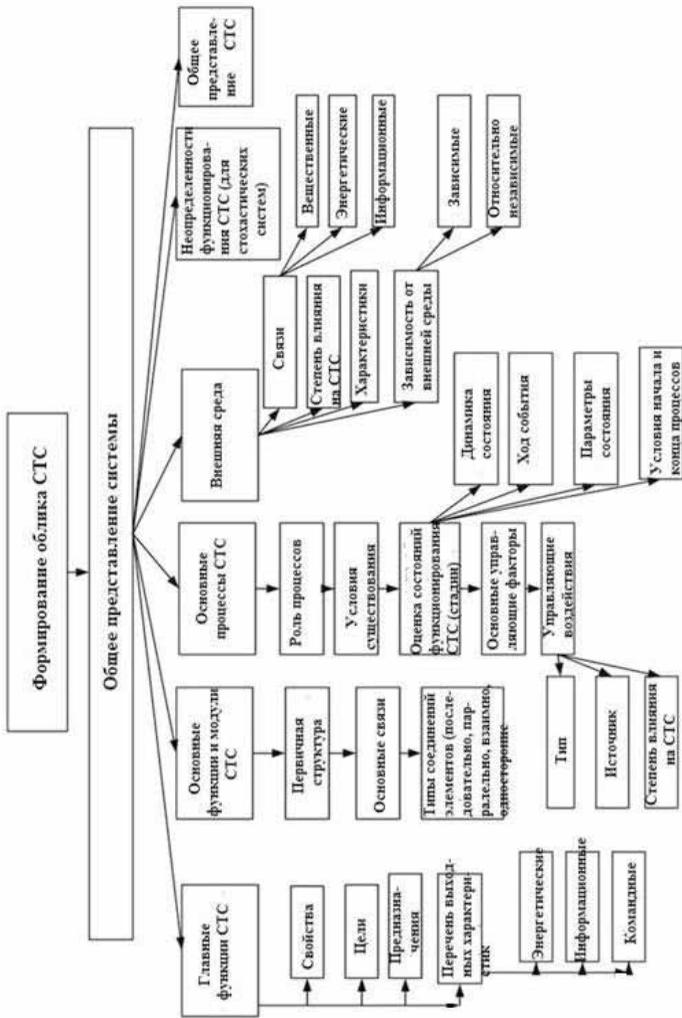


Рис. 65. Общее представление системы

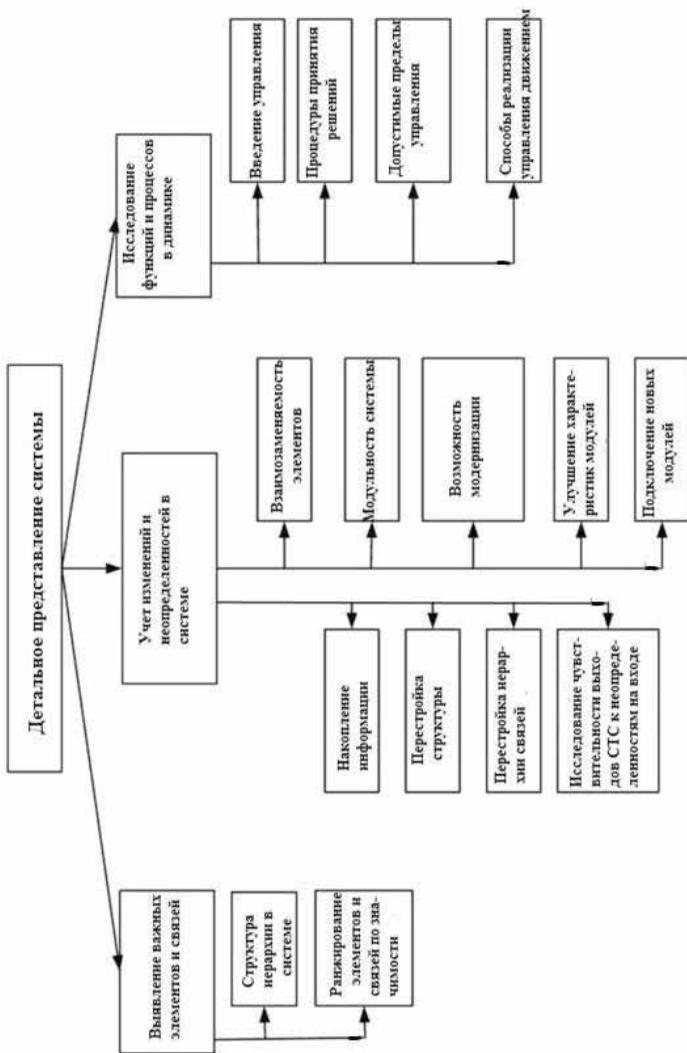


Рис. 66. Блок-схема формирования ТО СТС



Рис. 67. Этапы оценивания СТС или ее составляющих элементов

Таблица 30. Соотношение понятий качества и эффективности систем

Качество	Свойства	
Самоорганизация	Самообучаемость	
	Адаптируемость	
	Распознавание ситуаций	
	Свобода выбора решений	
Способность	Ресурсоемкость	
	Оперативность	
	Результативность	Мощность
	Эффективность	Производительность
Управляемость	Инерционность	
	Связность	
	Гибкость	
	Точность	
	Наблюдаемость	
Помехоустойчивость	Надёжность	
	Пропускная способность	
	Эффективное кодирование	
	Электромагнитная совместимость	
Устойчивость	Прочность	
	Гомеостазис	
	Стойкость к воздействиям	
	Сбалансированность	
	Структурная устойчивость	Техническая надёжность
		Живучесть

### 3.7. Полуаналитический метод исследования СТС

В работах [ 40-45 ] приведено множество методов оптимизации сложных систем. Далее рассматривается полуаналитический (спектральный) метод исследования переходных процессов, разработанный проф., д.т.н. Кузовковым Н.Т. и стар. научн.сотр., к.т.н. Абраменко Г.В.[ 61].

В общем виде линейное неоднородное дифференциальное уравнение системы с одним входом  $x(t)$  и одним выходом  $y(t)$  имеет вид

$$\sum_{i=0}^n a_i y^{(i)}(t) = \sum_{i=0}^m b_i x^{(i)}(t).$$

Его решение методом вариации произвольных постоянных достаточно сложно. С помощью преобразования Лапласа можно перейти к передаточной функции и проводить исследования СТС с помощью традиционных методов теории автоматического регулирования и управления.

В данном разделе рассматривается полуаналитический (спектральный) метод исследования переходных процессов. Спектральный метод предполагает построение решения в усеченного ряда по некоторой системе ортогональных функций, удовлетворяющего заданным граничным условиям[62]. Под спектром понимается совокупность коэффициентов Фурье указанного разложения решения, причем задача заключается в определении этого спектра. В данном разделе изложен один из методов решения этой задачи, основанный на использовании тригонометрических функций в качестве базовых. Метод заключается в следующем.

В дифференциальном уравнении переходят к такой новой зависимой переменной, что при периодическом продолжении решения из заданного интервала на границах этого интервала разрывов решения или его производных не образуется. Это на порядок убыстряет сходимость ряда, представляющего решение. Преобразованием Фурье дифференциальное уравнение сводится к системе линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов Фурье искомого ряда, причем каждое уравнение соответствует некоторому граничному условию. Эти уравнения можно разрешить каким-либо методом относительно упомянутых коэффициентов Фурье. В работах [61,62] подробно рассмотрено интегрирование уравнений второго порядка при заданных граничных условиях. Ниже рассматривается интегрирование уравнений любого порядка.

Пусть требуется определить решение уравнения

$$f_N(x)y^{(N)} + f_{N-1}(x)y^{(N-1)} + \dots + f_0y = g(x), \quad (3.1)$$

на интервале  $[0, R]$ , удовлетворяющее на границах интервала следующим образом:

$$y^{(k)}(0) = y_0^{(k)}, k = 0, 1, \dots, \nu - 1;$$

$$y^{(k)}(R) = R_R^{(k)}, k = 0, 1, \dots, \mu - 1; (\nu + \mu = N).$$

Другими словами,  $\nu$  условий задаются в начальной точке интервала интегрирования,  $\mu$  условий определяются в конечной точке интервала. Такая постановка не совсем обычна в традиционном смысле, но имеет практическое значение при проектировании, например, жидкостных ракет.

Применим подстановку  $y(x) = Y(x) + h(x)$ , где  $h(x)$  — произвольная функция, вводимая таким образом, чтобы граничные условия в отношении  $Y(x)$  ( $k = 0, 1, \dots$ ) были нулевыми. Уравнение относительно новой переменной

$$f_N(x)Y^{(N)} + f_{N-1}(x)Y^{(N-1)} + \dots + f_0Y = r(x), \quad (3.2)$$

где

$$r(x) = g(x) - \sum_{p=0}^N h^{(p)}(x) f_p(x). \quad (3.2a)$$

Примем функцию  $h(x)$  в виде многочлена

$$h(x) = \sum_{m=0}^{N-1} h_m x^m, \quad (3.3)$$

Коэффициенты  $h_m$  многочлена подлежат определению из условия обнуления граничных условий.

Граничные значения функции  $Y(x)$  и ее  $k$  производных равны нулю, если граничные условия  $y(x)$  и ее  $k$  производных совпадают со значениями функции  $h(x)$  и ее  $k$  производных в точках 0 и  $R$ . Функция  $Y(x)$  представляет решение уравнения (3.2).

Будем искать это решение в виде разложения в ряд Фурье по синусам или по косинусам на заданном интервале  $[0, R]$ . Следовательно, решение ищется в форме

**по синусам**

$$Y(x) = \frac{2}{R} \sum_{q=1}^{\infty} b_q \sin \frac{q\pi x}{R} \quad (3.4)$$

или в форме **по косинусам**

$$Y(x) = \frac{a_0}{R} + \frac{2}{R} \sum_{q=1}^{\infty} a_q \cos \frac{q\pi x}{R}, \quad (3.5)$$

где  $b_q$  и  $a_q$  — коэффициенты Фурье.

Преобразуем уравнение (3.2) в систему алгебраических уравнений относительно коэффициентов  $b_n$  ( $n=1, 2, \dots$ ). Для этого умножим уравнение (3.2) на  $\sin \frac{n\pi x}{R}$  и проинтегрируем от  $x=0$  до  $x=R$

$$\sum_{p=0}^N \left\{ \int_0^R f_p(x) Y^{(p)} \sin \frac{n\pi x}{R} dx \right\} = \int_0^R r(x) \sin \frac{n\pi x}{R} dx, \quad (3.6)$$

( $n=1, 2, \dots$ ).

В этом уравнении функции  $f_k(x)$  раскладываем в ряды Фурье. Разложение производим **по косинусам** в случае четных  $k$  ( $k=2p$ ), так что

$$f_{2p}(x) = \frac{\lambda_0^{2p}}{R} + \frac{2}{R} \sum_{l=1}^{\infty} \lambda_l^{2p} \cos \frac{l\pi x}{R}, \quad (3.7)$$

( $p=0, 1, 2, \dots$ )

и **по синусам** — в случае нечетных  $k$  ( $k=2p+1$ )

$$f_{2p+1}(x) = \frac{2}{R} \sum_{l=1}^{\infty} \mu_l^{2p+1} \sin \frac{l\pi x}{R}, \quad (3.8)$$

( $p=0, 1, 2, \dots$ ).

Здесь

$$\lambda_l^p = \int_0^R f_p(x) \cos \frac{l\pi x}{R} dx,$$

( $p=0, 1, 2, \dots$ );

$$\mu_l^p = \int_0^R f_p(x) \sin \frac{l\pi x}{R} dx, \quad (3.9)$$

( $p=1, 2, 3, \dots$ ).

Вследствие нулевых граничных условий ряд (3.4) имеет хорошую сходимость и его можно дифференцировать необходимое число раз. Четные производные имеют вид

$$Y^{(2p)} = \frac{2(-1)^p}{R} \left(\frac{\pi}{R}\right)^{2p} \sum_{q=1}^{\infty} b_q q^{2p} \sin \frac{q\pi x}{R}, \quad (3.9a)$$

$$(p=0,1,2,\dots),$$

а нечетные

$$Y^{(2p+1)} = \frac{2(-1)^p}{R} \left(\frac{\pi}{R}\right)^{2p+1} \sum_{q=1}^{\infty} b_q q^{2p+1} \cos \frac{q\pi x}{R}, \quad (3.9б)$$

$$(p=0,1,2,\dots),$$

где 
$$b_q = \int_0^R Y(x) \sin \frac{q\pi x}{R} dx (q=1,2,\dots).$$

В зависимости от порядка  $N$  уравнения (3.2) число производных вида  $Y^{(4p)}$  есть  $E\left(\frac{N}{4}\right)+1$ , вида  $Y^{(4p+1)}$  —  $E\left(\frac{N-1}{4}\right)+1$ , вида  $Y^{(4p+2)}$  —  $E\left(\frac{N-2}{4}\right)+1$ , вида  $Y^{(4p+3)}$  —  $E\left(\frac{N-3}{4}\right)+1$ , где  $E$  — целая часть действительного числа.

В отношении этих целых частей выполняется равенство

$$E\left(\frac{N}{4}\right) + E\left(\frac{N-1}{4}\right) + E\left(\frac{N-2}{4}\right) + E\left(\frac{N-3}{4}\right) + 4 = N + 1.$$

Для членов преобразованного уравнения введем обозначение

$$\delta_i = \int_0^R f_i(x) Y^{(i)}(x) \sin \frac{n\pi x}{R} dx, \quad (3.10)$$

$$(i=0,1,2,\dots).$$

Чтобы определить выражения  $\delta_{2p}$ , подставляем (3.9a) и ((3.7) в (3.10)

$$\delta_{2p} = \int_0^R \left( \lambda_0^{2p} + \frac{2}{R} \sum_{l=1}^{\infty} \lambda_l^{2p} \cos \frac{l\pi x}{R} \right) \left[ \frac{2(-1)^p}{R} \left(\frac{\pi}{R}\right)^{2p} \times \sum_{q=1}^{\infty} b_q q^{2p} \sin \frac{q\pi x}{R} \right] \sin \frac{n\pi x}{R} dx$$

$$(p=0,1,2,\dots). \quad (3.11)$$

Учитывая формулы

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)],$$

$$\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma = \frac{1}{4} [-\cos(\alpha + \beta - \gamma) + \cos(\beta + \gamma - \alpha) + \cos(\gamma + \alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta + \gamma)]$$

и принимая во внимание, что

$$\int_0^R \sum_{p=1}^{\infty} \Psi_p(x) dx = \sum_{p=1}^{\infty} \int_0^R \Psi_p(x) dx, \quad (3.12)$$

$$\sum_{\alpha, \beta=1}^{\infty} \int_0^R \cos \frac{(\alpha - \beta - \gamma) \pi x}{R} dx = \begin{cases} 0 & \text{при } \alpha, \beta, \gamma, \text{ кроме } \alpha - \beta - \gamma = 0, \\ R & \text{при } \alpha - \beta - \gamma = 0, \end{cases}$$

перепишем выражение (3.11) в виде

$$\delta_{2p} = \frac{(-1)^p}{R} \left( \frac{\pi}{R} \right)^{2p} \left\{ \frac{\lambda_0^{2p}}{R} \sum_{\substack{q=1 \\ n=q}}^{\infty} b_q q^{2p} - \frac{1}{R} \sum_{q=1}^{\infty} \lambda_{n+q}^{2p} b_q q^{2p} + \right. \\ \left. + \frac{1}{R} \sum_{q=n+1}^{\infty} \lambda_{q-n}^{2p} b_q q^{2p} + \frac{1}{R} \sum_{q=1}^{n-1} \lambda_{n-q}^{2p} b_q q^{2p} \right\}.$$

Так как справедливо равенство

$$\sum_{\substack{q=1 \\ n=q}}^{\infty} \lambda_0^{2p} b_q q^{2p} + \sum_{q=n+1}^{\infty} \lambda_{q-n}^{2p} b_q q^{2p} + \sum_{q=1}^{n-1} \lambda_{n-q}^{2p} b_q q^{2p} = \sum_{q=1}^{\infty} \lambda_{|n-q|}^{2p} b_q q^{2p},$$

окончательно имеем

$$\delta_{2p} = \frac{(-1)^p}{R} \left( \frac{\pi}{R} \right)^{2p} \sum_{q=1}^{\infty} (\lambda_{|n-q|}^{2p} - \lambda_{n+q}^{2p}) b_q q^{2p}, \quad (3.13)$$

$$(p = 0, 1, 2, \dots).$$

Отсюда при четном  $p$  получим выражение  $\delta_{4p}$ , а при нечетном — выражение  $\delta_{4p+2}$ .

Из выражений (3.9,б), (3.8) и (3.10) аналогичным образом находим

$$\delta_{2p+1} = \int_0^R \frac{2}{R} \sum_{l=1}^{\infty} \mu^{2p+1} \sin \frac{l \pi x}{R} \frac{2(-1)^p}{R} \left( \frac{\pi}{R} \right)^{2p+1} \times \\ \times \sum_{q=1}^{\infty} b_q q_{2p+1} \cos \frac{q \pi x}{R} \sin \frac{n \pi x}{R} dx.$$

Это выражение при учете формул (3.12) можно привести к виду

$$\delta_{2p+1} = \frac{(-1)^p}{R} \left( \frac{\pi}{R} \right)^{2p+1} \left\{ \sum_{q=1}^{\infty} (\mu_{n+q}^{2p+1} - \mu_{|n-q|}^{2p+1}) + 2 \sum_{q=1}^{n-1} \mu_{n-q}^{2p+1} b_q q^{2p+1} \right\}, \quad (3.14)$$

( $p = 0, 1, 2, \dots$ ).

Отсюда при четных  $p$  находим  $\delta_{4p+1}$ , а при нечетных -  $\delta_{4p+3}$ . Таким образом, разыскивая решение в виде синусного ряда, можно уравнение (3.2) свести к следующей системе алгебраических уравнений относительно коэффициентов  $b_q$

$$\sum_{p=0}^{E\left(\frac{N}{4}\right)} \delta_{4p} + \sum_{p=0}^{E\left(\frac{N-1}{4}\right)} \delta_{4p+1} + \sum_{p=0}^{E\left(\frac{N-2}{4}\right)} \delta_{4p+2} + \sum_{p=0}^{E\left(\frac{N-3}{4}\right)} \delta_{4p+3} = \beta_n, \quad (3.15)$$

( $n = 1, 2, \dots$ ).

Здесь

$$\delta_{4p} = \frac{1}{R} \left( \frac{\pi}{R} \right)^{4p} \sum_{q=1}^{\infty} (\lambda_{|n-q|}^{4p} - \lambda_{n+q}^{4p}) b_q q^{4p};$$

$$\delta_{4p+1} = \frac{1}{R} \left( \frac{\pi}{R} \right)^{4p+1} \left\{ \sum_{q=1}^{\infty} (\mu_{n+q}^{4p+1} - \mu_{|n-q|}^{4p+1}) b_q q^{4p+1} + 2 \sum_{q=1}^{n-1} \mu_{n-q}^{4p+1} b_q q^{4p+1} \right\}; \quad (3.15a)$$

$$\delta_{4p+2} = -\frac{1}{R} \left( \frac{\pi}{R} \right)^{4p+2} \sum_{q=1}^{\infty} (\lambda_{|n-q|}^{4p+2} - \lambda_{n+q}^{4p+2}) b_q q^{4p+2};$$

$$\delta_{4p+3} = -\frac{1}{R} \left( \frac{\pi}{R} \right)^{4p+3} \left\{ \sum_{q=1}^{\infty} (\mu_{n+q}^{4p+3} - \mu_{|n-q|}^{4p+3}) b_q q^{4p+3} + 2 \sum_{q=1}^{n-1} \mu_{n-q}^{4p+3} b_q q^{4p+3} \right\}.$$

Коэффициенты  $\lambda^j$  и  $\mu^j$  определяются формулами (3.9), причем  $j$  — номер коэффициента уравнения (3.1);  $i$  — номер коэффициента члена разложения в ряд Фурье функции  $f_j(x)$ ;  $n$  — число членов ряда (3.4), аппроксимирующего функцию  $Y(x)$ .

Выражения (3.15) и (3.15a) позволяют сразу записать вместо исходного уравнения (3.2) систему алгебраических уравнений относительно коэффициентов Фурье  $b_q$  ( $q = 1, 2, \dots$ ) искомого решения. К этой системе необходимо добавить уравнения, связывающие коэффициенты степенного ряда  $h(x)$  с заданными граничными условиями. Из выражения (3.4) следует, что функция  $Y(x)$  и ее четные производные  $Y^{(2k)}(x)$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) обращаются в нуль на концах интервала, так что для системы (3.15)

требуется  $E\left(\frac{N}{4}\right)$  добавочных уравнений, обеспечивающих обращение в нуль нечетных производных  $Y^{(2k+1)}(x)$  на границах интервала. Согласно (3.9б) эти добавочные уравнения выбираются из уравнений

$$Y^{(2k+1)}(0) = \sum_{q=1}^{\infty} q^{2p+1} b_q = 0, \quad (3.16a)$$

$$Y^{(2k+1)}(R) = \sum_{q=1}^{\infty} (-1)^p q^{2p+1} b_q = 0, \quad (3.16б)$$

$$(p = 0, 1, 2, \dots).$$

Выбор определяется заданными граничными условиями.

Рассмотрим для примера случай, когда  $N$  — четное число. Запишем систему (3.15) в матричной форме

$$\sum_{j=1}^n A_{i,j} b_j = G_i - \sum_{m=0}^{N-1} D_{i,m} h_m, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

где  $A_{i,j}$  и  $D_{i,m}$  - матричные коэффициенты при неизвестных  $b_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) и  $h_m$  ( $m = 0, 1, \dots, N-1$ ). Следовательно, имеем систему из  $n$  уравнений с  $(n+N)$  неизвестными. Из уравнения  $y(x) = h(x) + Y(x)$  при учете заданных граничных условий, а также условий  $Y^{(2p)}(0) = Y^{(2p)}(R) = 0$  ( $p = 0, 1, \dots$ ) определяем  $N/2$  коэффициентов степенной функции  $h(x)$ . Выбирая далее из (3.16а), (3.16б) дополнительные  $N/2$  уравнений и добавляя их к системе (3.15), приходим к системе из  $(n+N/2)$  уравнений с  $(n+N/2)$  неизвестными.

Если  $n$  — достаточно велико, можно неизвестные коэффициенты  $h_m$  выразить через  $b_q$  ( $q=1, 2, \dots$ ). Тогда система (3.15) сводится к системе с рангом  $n$ . Эту систему можно решать итерационным методом, но точность решения будет более низкой.

Точность решения уравнения (3.1) определяется прежде всего тем, в какой мере выбранная функция  $h(x)$  извлекает особенности из этого решения. Вид функции  $h(x)$  может быть произвольным. При выборе этой функции главное требование — улучшить сходимость решения по новой переменной  $Y(x)$ , что достигается как за счет отнесения особенностей решения по переменной  $y(x)$  к функции  $h(x)$ , так и за счет соответствующего формирования правых частей системы (3.15). Функцию  $h(x)$  можно, например, принять в виде многочлена по четным степеням

$$h(x) = \sum_{m=0}^{N-1} h_m x^{2m}.$$

Такую функцию  $h(x)$  можно рекомендовать при нахождении  $Y(x)$  в виде разложения *по косинусам*.

Относительно выбора  $h(x)$  можно сделать следующее замечание. Из уравнений (3.16 а), (3.16 б) и заданных граничных условий следует, что на функцию  $h(x)$  можно наложить  $2N$  ограничений. Выбором  $h(x)$  можно учесть условия (3.16 а), (3.16 б) для  $N/2$  производных от  $Y(x)$  на обоих концах интервала  $[0, R]$ . Можно также потребовать выполнения всех условий вида (3.16 а), (3.16 б), что приводит к функции  $h(x)$  вида

$$h(x) = \sum_{m=0}^{2N-1} h_m x^m.$$

Но этот последний выбор значительно усложняет решение задачи.

Преобразование уравнения (3.2) в систему алгебраических уравнений относительно коэффициентов Фурье  $a_n$  ( $n=0, 1, 2, \dots$ ) в случае представления решения косинусным рядом осуществляется аналогичным образом. Каждый член уравнений (3.2) умножается на  $\cos \frac{n\pi x}{R}$  и интегрируется от  $x=0$  до  $x=R$

$$\sum_{p=0}^N \left\{ \int_0^R f_p(x) Y^{(p)}(x) \cos \frac{n\pi x}{R} dx \right\} = \alpha_n, \quad (3.17)$$

где 
$$\alpha_n = \int_0^R r(x) \cos \frac{n\pi x}{R} dx, \quad (n=0, 1, 2, \dots).$$

Вводим обозначения:

$$\delta_{4p+i}^n = \int_0^R f_{4p+i}(x) Y^{4p+i}(x) \cos \frac{n\pi x}{R} dx,$$

$$i = 0, 1, 2, 3; \quad n = 1, 2, \dots;$$

$$\delta_{4p+i}^0 = \int_0^R f_{4p+i}(x) Y^{4p+i}(x) dx,$$

$$(3.18)$$

$$i = 0, 1, 2, 3; \quad n = 0;$$

$$\delta_0^n = \int_0^R f_0(x) Y(x) \cos \frac{n\pi x}{R} dx,$$

$$n = 0, 1, 2, \dots,$$

где  $Y(x)$  представляется рядом (3.5). Проводя для ряда (3.5) такие же преобразования, как и для ряда (3.4), получим с учетом (3.12) выражения  $\delta_i^n$ . Наличие в разложении (3.5) свободного члена  $a_0$  обуславливает дополнительное уравнение в приводимой ниже системе алгебраических уравнений, заменяющей уравнение (3.2). Эта система имеет вид

$$\delta_0^0 + \sum_{p=1}^{E\left(\frac{N}{4}\right)} \delta_{4p}^0 + \sum_{p=0}^{E\left(\frac{N-1}{4}\right)} \delta_{4p+1}^0 + \sum_{p=0}^{E\left(\frac{N-2}{4}\right)} \delta_{4p+2}^0 + \sum_{p=0}^{E\left(\frac{N-3}{4}\right)} \delta_{4p+3}^0 = \alpha_0; \quad (3.19)$$

$$\delta_0^n + \sum_{p=1}^{E\left(\frac{N}{4}\right)} \delta_{4p}^n + \sum_{p=0}^{E\left(\frac{N-1}{4}\right)} \delta_{4p+1}^n + \sum_{p=0}^{E\left(\frac{N-2}{4}\right)} \delta_{4p+2}^n + \sum_{p=0}^{E\left(\frac{N-3}{4}\right)} \delta_{4p+3}^n = \alpha_n; \quad (3.20)$$

$$(n = 1, 2, \dots).$$

Входящие в уравнение (3.19) функции  $\delta_i^0$  определяются следующими формулами (их вывод аналогичен случаю разложения по синусам):

$$\delta_0^0 = \frac{\lambda_0^0 a_0}{R} + \frac{2}{R} \sum_{q=1}^{\infty} \lambda_q^0 a_q; \quad (3.21)$$

$$\delta_{2p}^0 = (-1)^p \frac{2}{R} \left( \frac{\pi}{R} \right)^{2p} \sum_{q=1}^{\infty} \lambda_q^{2p} a_q q^{2p}, (p = 1, 2, \dots); \quad (3.22)$$

$$\delta_{2p+1}^0 = (-1)^{p+1} \frac{2}{R} \left( \frac{\pi}{R} \right)^{2p+1} \sum_{q=1}^{\infty} \mu_q^{2p+1} a_q q^{2p+1}, (p = 0, 1, 2, \dots). \quad (3.23)$$

Функции  $\delta_i^n$ , входящие в уравнения (3.20), имеют вид

$$\delta_0^n = \frac{\lambda_n^0 a_0}{R} + \frac{1}{R} \sum_{q=1}^{\infty} (\lambda_{q+n}^0 + \lambda_{|q-n|}^0) a_q; \quad (3.24)$$

$$\delta_{2p}^n = (-1)^p \frac{1}{R} \left( \frac{\pi}{R} \right)^{2p} \sum_{q=1}^{\infty} (\lambda_{q+n}^{2p} + \lambda_{|q-n|}^{2p}) a_q q^{2p}, (p = 1, 2, \dots); \quad (3.25)$$

$$\delta_{2p+1}^n = (-1)^{p+1} \frac{1}{R} \left( \frac{\pi}{R} \right)^{2p+1} \left\{ \sum_{q=1}^{\infty} (\mu_{n+q}^{2p+1} - \mu_{n-q}^{2p+1}) a_q q^{2p+1} + 2 \sum_{q=n+1}^{\infty} \mu_{q-n}^{2p+1} q^{2p+1} a_q \right\}, (p = 0, 1, 2, \dots). \quad (3.26)$$

Учет граничных условий производится с помощью функции  $h(x)$  аналогично тому, как это изложено при разложении  $Y$  по синусам.

Система (3.15) или (3.19), (3.20) представляет собой матричное уравнение относительно неизвестных коэффициентов Фурье искомого решения и функции  $h(x)$

$$AX = C. \quad (3.27)$$

Здесь  $A = \{A_{ij}\}$  – матрица коэффициентов при неизвестных;  $X = \{b_1, \dots, b_k\}^T$  (или  $X = \{a_0, a_1, \dots, a_k\}^T$ ) – матрица-столбец, элементами которой служат искомые коэффициенты Фурье;  $C = \{\beta_1, \dots, \beta_k\}^T$  (или  $C = \{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_k\}^T$ ) – матрица-столбец правых частей.

Предполагая, что матрица  $A$  – невырожденная, получим решение уравнения (3.27)

$$X = A^{-1} C. \quad (3.28)$$

Таким образом, решение уравнения (3.1) можно получить, выполняя следующие операции.

1. Уравнение (3.2) с помощью соотношений (3.15) или (3.19), (3.20) преобразуем в систему алгебраических уравнений относительно коэффициентов ряда Фурье (3.4) или (3.5) (рис. 68 - 70).
2. При учете заданных граничных условий определяем коэффициенты ряда ((3.3) и дополнительные уравнения, выражающие обращение в нуль функции  $Y(x)$  и  $k$  ее производных на границах интервала.
3. Полученную систему уравнений (3.27), неизвестными в которой являются упомянутые коэффициенты Фурье [ $b_q$  ( $q=1, 2, \dots$ ) или  $a_q$  ( $q=0, 1, 2, \dots$ )], решаем каким-либо методом (методом Гаусса, по правилу Крамера согласно формуле (3.28) и др.).
4. Решая систему (3.27) при различных  $n$ , добиваемся получения решения с требуемой точностью.

Заметим, что порядок уравнения (3.1) не влияет на размерность систем (3.15) или (3.19), (3.20).

Определение коэффициентов Фурье облегчается при использовании таблиц

[63]. Например, для  $f_p = x^p$  в случае интервала  $[0, \pi]$  имеем

$$\mu_l^p = -\sum_{k=0}^p k! \binom{p}{k} \frac{\pi^{p-k}}{l^{k+1}} \cos\left(\frac{2l+k}{2} \pi\right),$$

( $l = 1, 2, \dots$ );

$$\lambda_0^p = \frac{\pi^{p+1}}{p+1}, \quad \lambda_l^p = -\sum_{k=0}^p k! \binom{p}{k} \frac{\pi^{p-k}}{l^{k+1}} \sin\left(\frac{2l+k}{2} \pi\right),$$

( $l = 1, 2, \dots$ ).

Если  $f_k = A_k = \text{const}$ , то для интервала  $[0, R]$  получим

$$\mu_l^k = \frac{A_k R}{\pi l} \left[ 1 - (-1)^l \right], \quad \lambda_0^k = A_k R, \quad \lambda_l^k = 0, \quad (l = 1, 2, \dots). \quad (3.29)$$

На рис. 68-70 представлены алгоритмы решения задачи при разложении по синусам и косинусам.

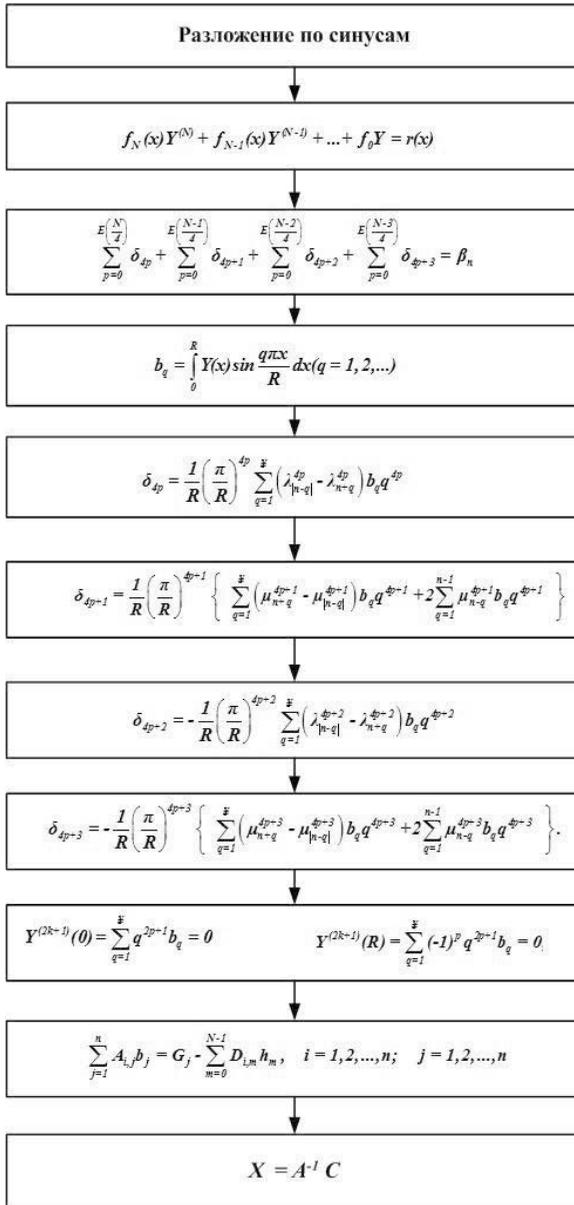


Рис. 68. Алгоритм решения задачи при разложении по синусам

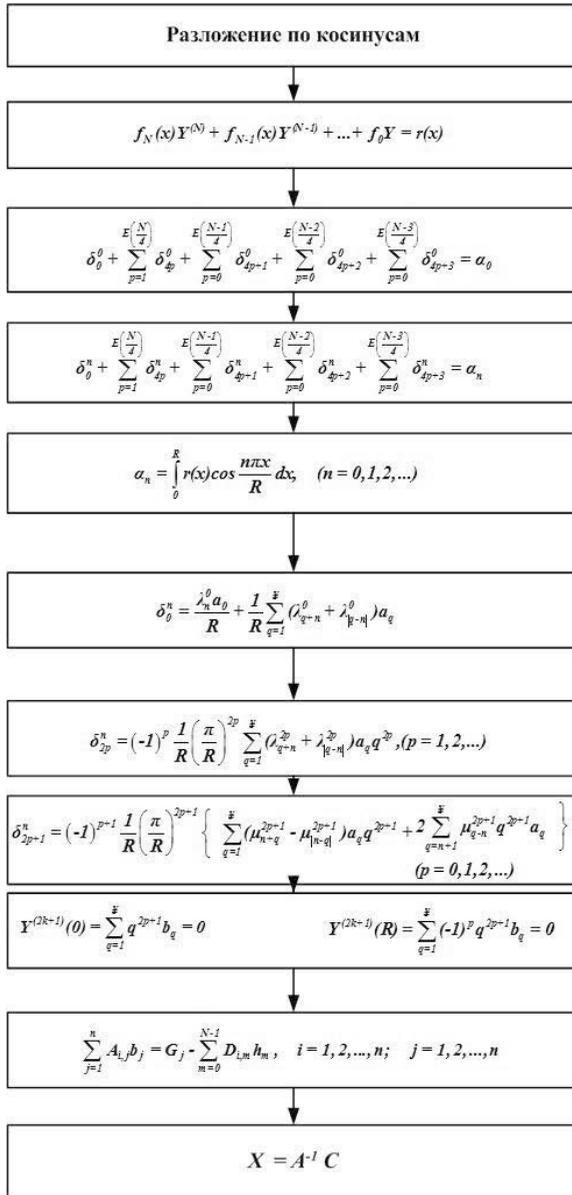


Рис. 69. Алгоритм решения задачи при разложении по косинусам

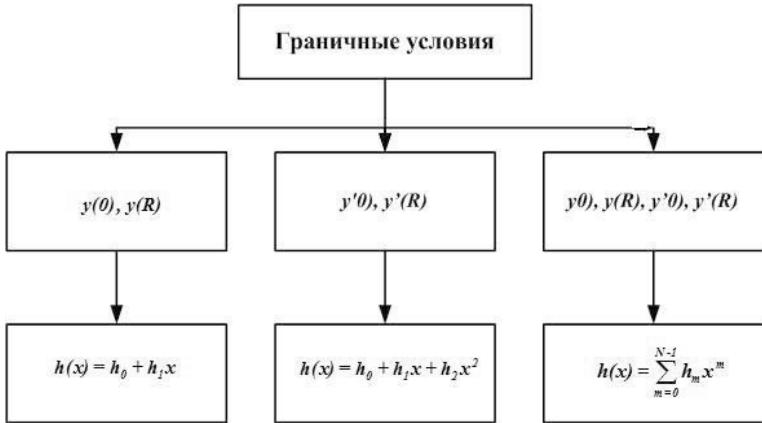


Рис. 70. Учет граничных условий

**Пример 3.8.**

В качестве примера преобразуем к системе алгебраических уравнений уравнение

$$Y'' + f(x)Y = r(x), \quad (3.30)$$

рассмотренное в работе [62]. Сопоставляя с уравнением (3.2), находим

$$N = 2, \quad f_2 = 1, \quad f_1 = 0, \quad f_0 = f(x).$$

Согласно формулам (3.29)  $\lambda_0^2 = R$ ;  $\lambda_n^2 = 0$  ( $n=1,2,\dots$ );  $\mu_i^1 = 0$  ( $i=1,2,\dots$ ).

Имеем также  $E\left(\frac{N}{4}\right) = E\left(\frac{N-1}{4}\right) = E\left(\frac{N-2}{4}\right) = 0$ .

Система (3.15) для данного случая

$$\delta_0 + \delta_1 + \delta_2 = \beta_n, \quad (n = 1, 2, \dots). \quad (3.31)$$

Поскольку  $p=0$ , а согласно (3.15а)

$$\delta_0 = \frac{1}{R} \sum_{q=1}^{\infty} (\lambda_{|n-q|}^0 - \lambda_{n+q}^0) b_q; \quad \delta_1 = 0; \quad \delta_2 = -\frac{\pi^2 n^2 b_n}{R^2},$$

где  $\lambda_n^0 = \int_0^R f(x) \cos \frac{n\pi x}{R} dx$ , ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ), приводим уравнение (3.31) к виду

$$\delta_0 + \delta_1 + \delta_2 = \frac{1}{R} \sum_{q=1}^{\infty} \left( \lambda_{|n-q|}^0 - \lambda_{n+q}^0 \right) b_q - \frac{\pi^2 n^2 b_n}{R^2} = \beta_n, \quad (3.32)$$

**Пример 3.9.** Граничные условия.

Удовлетворение граничным условиям достигается подходящим выбором функции  $h(x)$ .

1. Заданы  $y(0)$  и  $y(R)$ . В данном случае  $h(x)$  выбираем из условия

$$h(0) = y(0), \quad h(R) = y(R),$$

так что  $Y(0) = Y(R) = 0$  и получаем соотношение (3.32). Простейшей формой  $h(x)$  является линейная функция  $x$ .

2. Заданы  $y'(0)$  и  $y'(R)$ . Функцию  $h(x)$  выбираем таким образом, что

$$h'(0) = y'(0), \quad h'(R) = y'(R).$$

Тогда  $Y'(0) = Y'(R) = 0$ . В данном случае  $h(x)$  выбирается в виде квадратичной функции от  $x$ .

3. Заданы любые две из величин  $y(0), y(R), y'(0), y'(R)$ . Если исключить уже рассмотренные случаи 1 и 2, то остаются случаи задания  $y$  и  $y'$  на противоположных концах интервала или случаи задания этих величин на одном и том же конце интервала. Для каждого из этих случаев можно использовать подход согласно п.1 или 2, так как по-прежнему остается возможность выбрать функцию  $h(x)$  удовлетворяющую приведенным выше условиям.

**Пример 3.10.** Применение спектрального метода.

Рассмотрим уравнение

$$y'' - 2(1 + 2x^2)y = 0 \quad (3.33)$$

с граничными условиями  $y=1, dy/dx=0$  при  $x=0$ . Это уравнение имеет аналитическое решение  $y = \exp x^2$ , что позволит в дальнейшем оценить точность результатов численного решения.

Допустим, что необходимо найти решение в интервале от  $x=0$  до  $x=1$ . Удобно свести интервал интегрирования к базисному  $R=\pi$ . В данном случае это достигается подстановкой  $x = \zeta / \pi$ , так что уравнение (3.33) в отношении  $\zeta$  принимает вид

$$y'' - \frac{2}{\pi^2} \left( 1 + \frac{2\zeta^2}{\pi^2} \right) y = 0 \quad (3.34)$$

при  $y(0)=1, y'(0)=0.$  (3.35)

В соответствии с изложенным ранее решение можно выразить или через  $a_n$  или через  $b_n$ . Выберем вариант  $a_n$ . В этом случае функция  $h(x)$  должна удовлетворять условию  $h'(0) = y'(0) = 0$  явно и условию  $h'(\pi) = y'(\pi)$  неявно. Выберем эту функцию в виде  $h(x) = 1 + Kx^2$ , когда она одновременно удовлетворяет и условию  $h(0) = 1$ . Постоянная  $K$  произвольна и должна быть определена так, чтобы обеспечить  $y(0) = 1$ , что обуславливает  $Y(0) = 0$  и

$$a_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} a_n = 0. \quad (3.36)$$

Подставляя  $h(x)$  в уравнения

$$\gamma_n = \alpha_n + j\beta_n = \int_0^R r \exp \frac{jn\pi x}{R} dx$$

и

$$\lambda_n = \int_0^R f \cos \frac{n\pi x}{R} dx,$$

получим

$$\lambda_0 = -\frac{10}{3\pi}; \quad \lambda_n = \frac{8}{\pi^3 n^2} (-1)^{n+1};$$

$$\alpha_0 = \frac{10}{3\pi} - \frac{8}{15} K\pi; \quad \alpha_n = (-1)^n \left\{ \left( \frac{20}{\pi n^2} - \frac{96}{\pi^3 n^4} \right) K + \frac{8}{\pi^3 n^2} \right\}, \quad (3.37)$$

Действительно, подставляя функцию  $h(x) = 1 + Kx^2$  в выражение  $r(x)$ , получим  $r(x) = -hf - h'' = (1 + Kx^2)2(1 + 2x^2) - 2K$  или после перехода к независимой переменной  $\zeta$

$$r(\zeta) = \left( 1 + K \frac{\zeta^2}{\pi^2} \right) \frac{2}{\pi^2} \left( 1 + \frac{2\zeta^2}{\pi^2} \right) - \frac{2K}{\pi^2}.$$

Подставляя это выражение в уравнения для  $\gamma_n$  и  $\lambda_n$ , приведенными выше, находим для  $n=0$ :

$$\alpha_0 = \int_0^{\pi} \left[ \frac{4K}{\pi^6} \zeta^4 + \frac{2K+4}{\pi^4} \zeta^2 + \frac{2-2K}{\pi^2} \right] d\zeta = -\frac{8}{15\pi} K + \frac{10}{3\pi};$$

$$\lambda_0 = -\frac{2}{\pi^2} \int_0^{\pi} \left( 1 + \frac{2\zeta^2}{\pi^2} \right) d\zeta = -\frac{10}{3\pi}.$$

Аналогично находим  $\alpha_n$ ,  $\lambda_n$  при  $n \neq 0$ .

Рассмотрим теперь процесс вычислений. Ниже применяется итерационный способ решения. Примем точность расчета, характеризуемую пятью значащими цифрами. В уравнении  $(-\pi^2 n^2 / R^2) a_n + u_n = \alpha_n$  извлечем из  $u_n$  главные члены с  $a_0$  и  $\lambda_0$ , а оставшиеся члены обозначим  $\delta_n$ . Имеем:

$$\left( \frac{\lambda_0}{\pi} - n^2 \right) a_n + \delta_n = \alpha_n - \frac{a_0 \lambda_n}{\pi}, \quad (3.38)$$

( $n = 1, 2, 3, \dots$ );

$$\frac{a_0 \lambda_0}{\pi} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} a_n \lambda_n = \alpha_0. \quad (3.39)$$

Эти уравнения получаются приведением выражения  $w_n = u_n + jv_n = \int_0^R r \exp \frac{jn\pi x}{R} dx$

к виду

$$\begin{aligned} u_n &= \int_0^{\pi} fY \cos n\zeta d\zeta = \\ &= \int_0^{\pi} \left[ \frac{1}{\pi} \lambda_0 + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n \cos n\zeta \right] \left[ \frac{1}{\pi} a_0 + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\zeta \right] \cos n\zeta d\zeta = \\ &= \frac{a_0 \lambda_0}{\pi} + \frac{1}{\pi} \lambda_0 a_n + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} a_n \lambda_n + \delta_n \end{aligned} \quad (3.40)$$

и подстановкой в уравнение  $(-\pi^2 n^2 / R^2) a_n + u_n = \alpha_n$ . Выбор произвольной величины  $K$  подчинен условиям (3.38) и (3.39), что вытекает из выражений (3.37). Таким образом, по подстановке в уравнения (3.38), (3.39) вместо  $\alpha_0, \alpha_n$  выражений (3.37) приходим при учете уравнения (3.36) к системе из трех уравнений, в которых фигурируют  $K, a_0, a_n, \delta_n$ . Эту систему решаем относительно коэффициентов Фурье  $a_0, a_n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) искомого решения.

Расчет проводим итерационным способом.

Сначала корректирующие члены  $\delta_n$  полагаем равными нулю. Выбирая достаточно большое число членов  $a_n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ), получаем замкнутую систему алгебраических уравнений, решая которую, находим в первом приближении  $a_n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) и  $K$ . Эти значения для случая  $n = 13$  приведены в первом столбце табл. 31.

Таблица 31. Величины коэффициентов  $a_n$

$n$	$a_n$		$n$	$a_n$	
	1-е приближение	окончательное решение		1-е приближение	окончательное решение
0	-1,39267	-1,3911	7	0,00077	0,00071
1	0,77654	0,76296	8	-0,00046	-0,00042
2	-0,09651	-0,08049	9	0,00028	0,00026
3	0,02133	0,01854	10	-0,00019	-0,00017
4	-0,00701	-0,00625	11	0,00013	0,00013
5	0,00212	0,00264	12	-0,00009	-0,00009
6	-0,00142	-0,00130	13	0,00007	0,00007

Полученные значения  $a_n$  используем далее для оценки  $\delta_n$  согласно уравнению (3.40), а затем производим расчет по упомянутым уравнениям новых значений  $K$  и  $a_n$ . После этого расчетный цикл повторяем. Процесс оказывается быстро сходящимся: достаточно двух или трех итераций. Окончательно полученные значения  $a_n$  приведены во втором столбце табл. 31.

Достаточное число коэффициентов  $a_n$  устанавливалось следующим образом: по умножении на  $2/\pi$  следующие значение  $a_n$  не добавляло чего-либо к четвертой значащей цифре решения. Четырех значащих цифр в  $Y$  в данном случае достаточно, чтобы дать пять правильных цифр в  $y$ , что объясняется главным вкладом в значение  $y$  со стороны  $h(x)$ .

В табл. 32 приведены результаты расчета решения в нескольких точках интервала при учете различного числа членов ряда, представляющего решение ( $n = 2, 3, \dots, 13$ ). Сравнение со значениями точного решения показывает, что при  $n = 13$  в некоторых точках имеется почти семь правильных значащих цифр. Наибольшая ошибка (при  $x = 1$ ) составляет около 0,01%.

Из табл. 32 видно, что влияние  $\delta_n$  на пятую значащую цифру становится равным нулю при  $n = 11$  (а влияние на шестую значащую цифру становится равно нулю при  $n = 13$ ). Таким образом, для  $n \gg 11$  коэффициенты  $a_n$  можно точно рассчитать при  $\delta_n = 0$  до пятой значащей цифры.

Ранее отмечалось, что сходимость приближенного решения к точному можно ускорить, выбирая  $h(x)$  таким образом, чтобы члены последовательности  $a_n$  уменьшались быстрее. Для рассмотренного примера это положение подтверждается: правая часть уравнения (3.38) может быть сделана уменьшающейся как  $1/n^4$  путем выбора  $h(x)$  в виде полиномиальной функции высокого порядка с соответствующими коэффициентами.

Заметим, что при решении системы  $(-\pi^2 n^2 / R^2) a_n + u_n = \alpha_n$  по формуле (3.28) точность расчетов при прочих равных условиях выше. Однако в отличие от

итерационного способа этот с ростом  $n$  требует увеличения памяти ЭВМ.

Таблица 32. Результаты сравнения точного и приближенного решений

	$x=0,2$	$x=0,4$	$x=0,6$	$x=0,8$	$x=1,0$
	Точное решение $e^{x^2}$				
	1,0408107	1,1735108	1,4333294	1,8964808	2,7182818
	Приближенное решение с помощью спектрального метода				
$n$					
2	1,0519929	1,1941193	1,4397979	1,9046734	2,7628863
3	1,0357779	1,1701105	1,4319821	1,8857056	2,7182412
5	1,0397298	1,1733008	1,4323596	1,894996	2,7189391
8	1,040848	1,1736497	1,4336104	1,8969399	2,7191553
10	1,0408137	1,1735241	1,4333666	1,8965864	2,7187234
12	1,0408352	1,1735646	1,4333549	1,8964673	2,7185350
13	1,0407829	1,1734878	1,4333307	1,8964058	2,7183910

\*\*\*

В главе рассмотрены основные принципы применения системного анализа к проектированию СТС. Приведен полуаналитический метод исследования СТС.

## Глава 4. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА К ПОДСИСТЕМАМ СТС

### 4.1 Общее представление подсистем СТС

В данной главе рассматриваются особенности применения системного анализа к подсистемам СТС. Разбиение структуры СТС на подсистемы на третьем уровне проектирования было рассмотрено в разд. 3.1.

Для каждой подсистемы СТС записываются возможные варианты реализации исходя из существующих и перспективных разработок. Например, для СТС типа БЛА, ДПЛА, автономные летательные аппараты<sup>1</sup> и т.п. к подсистемам относятся: бортовой процессор (искусственный интеллект), навигационный блок, блок двигателей (двигателей), информационный блок, исполнительный блок, блок управления, измерительный блок, блок передачи информации и связи с командным пунктом, блок защиты информации, блок исходных данных, блок питания, топливный блок. В табл.33 представлены возможные различные варианты построения подсистем СТС.

Для каждой позиции таблицы записывается множество характеристик и параметров, входящих в технический паспорт (МГХ, точность, дальность действия и т.п.). Вторая группа характеристик представляет собой экспертные оценки. Баллы для экспертных оценок проставляются в интервале 0-1, или 1-10. Третья группа характеристик представляет собой расчетные величины: эффективность системы, стоимость выполнения операции, количество потребных СТС и т.п.

Далее применяя спектральный метод, изложенный в разд. 2.1, проводится ранжирование полученных вариантов.

Результатом исследования СТС помимо БД альтернативных вариантов должны выступать следующие множества:

- множество технических новшеств, направленных на достижение заданного критерия эффективности;
- множество «участков» насыщения, ограничивающих повышение заданного показателя эффективности;
- множество «узких» мест при проектировании СТС.

---

<sup>1</sup> Рассмотрение такого класса СТС не сужает задачу. Предлагаемый пример позволяет более конкретно

Таблица 33. Перечень подсистем СТС

Подсистема СТС		Варианты реализации подсистемы	Примечание
СТС	Процессор	Микропроцессор Процессор типа PC/104 Индустриальный процессор Аналоговое устройство Прочее	Возможен вариант отсутствия этой подсистемы
	Навигационный блок	Бесплатформенная инерциальная система Магнитометр Курсограф Навигационная система Глонасс/GPS Прочее	Возможен вариант отсутствия этой подсистемы
	Блок двигателей	Электрические движители Двигатели постоянного тока Прочее	
	Информационный блок	ИК-датчики Тепловизор Акустический датчик Радиодатчик Прочее	Возможен вариант отсутствия этой подсистемы
	Исполнительный блок	Рулевая машинка Прочее	
	Блок управления	Автономный алгоритм управления Дистанционное управление Комбинированное управление	Дистанционное управление: по радиоканалу, по линии связи, по телеканалу
	Измерительный блок	Датчик движения Датчик ветра Датчик положения	Возможен вариант отсутствия этой подсистемы
	Блок передачи информации	По радиоканалу По линии связи Накоплением в памяти процессора (или на флеш-диске, карте памяти, выносном винчестере) По космической связи На другую СТС	
	Блок защиты информации	Программно Аппаратно	Возможен вариант отсутствия этой подсистемы
	Блок исходных данных	БД постоянных Данные маршрута Атмосферные данные Данные по объекту наведения Прочее	
Блок питания	Аккумуляторы Батарея Другие источники питания		
	Топливный блок	Бензин Керосин Иные виды горючего	Возможен вариант отсутствия этой подсистемы
Командный пункт		Стационарный Мобильный	Возможен вариант отсутствия этой подсистемы
Средства связи с СТС		Радиоантенна Космическая связь Подвижная антенна (в том числе и подвесная)	Возможен вариант отсутствия этой подсистемы
Средства отображения информации		Монитор ПЭВМ Специальный экран На бумажном носителе В электронном виде (на диске, флеш-диске, карте памяти, выносном винчестере) Прочее	

На рис. 71 приведен пример блок-схемы обобщенной мобильной СТС. Согласно рис. 71 СТС включает следующие подсистемы: корпус, видео- или аудио- датчики информации, систему управления, двигатели (движители), источники питания, передатчик-приемник информации, микропроцессор, цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи (ЦАП-АЦП) (при необходимости микроконтроллеры), которые имеют следующие параметры и характеристики:

- технические характеристики;
- массогабаритные характеристики;
- энергопотребление;
- точность наведения, доставки и т.п.;
- быстродействие;
- ресурсы (энергетические, временные, информационные);
- время функционирования;
- скоростные параметры;
- требования по работоспособности в зависимости от времени суток, сезона, погоды;
- помехоустойчивость;
- помехозащищенность;
- противодействие (активное и пассивное);
- время в активном движении и в пассивном состоянии;
- дальность передачи видео- и аудио- информации;
- параметры микропроцессора;
- параметры антенны и передатчика;
- эксплуатационные требования (перегрузки доставки, температуры, годность к применению).

Отдельные требования предъявляются к датчикам видео и аудио- информации:

- по массогабаритным характеристикам;
- по энергопотреблению;
- по точности;
- по быстродействию;
- по ресурсам;
- по времени функционирования;
- по скоростным параметрам;

- по требованиям к функционированию в зависимости от времени суток, сезона, погоды;
- по помехоустойчивости;
- по помехозащищенности.

Циклограмма работы подобной автоматической СТС может быть реализована в двух вариантах.

Первый вариант включает следующие этапы организации движения СТС:

1. Траектория движения и поиска требуемого объекта заложена в бортовом процессоре.
2. После доставки СТС в начальную точку включается источник питания (по команде или по временному реле).
3. Бортовой процессор формирует команду на движение СТС. Функционирует система управления и двигателя. Алгоритм собственно движения СТС представляет собой отдельную задачу исследований.
4. По команде бортового процессора включаются датчики видео- и аудио-информации.
5. Съем необходимой информации осуществляется:
  - в память бортового процессора;
  - на пункт управления.

Второй вариант представляет собой следующую ситуацию:

1. В случае аварийного выхода из строя СТС оператор дистанционно посылает команды на управление его движением и на вкл/выкл датчиков информации.
2. Датчик может передавать информацию либо на антенну (совместимость сигналов «аналог-аналог»), либо через бортовой процессор (датчик – АЦП – процессор – антенна).

Таким образом, на первом этапе проектируемая СТС записывается в виде

- структуры СТС, включающей перечень подсистем и модулей;
- перечня множества тактических и проектных параметров и характеристик СТС и ее подсистем;
- циклограммы функционирования СТС и ее подсистем.

Возможны следующие случаи проектирования подсистем СТС

- все подсистемы разрабатываются с «нуля»;
- есть уже готовые подсистемы и задача состоит в модернизации или модификации этой подсистемы требованиям задачи;

— есть готовые подсистемы, но их нельзя модернизировать под данную задачу.

Под средой понимается множество объектов вне данного элемента СТС (подсистемы, модуля), которые оказывают влияние на элемент и сами находятся под воздействием элемента или СТС.

Подсистема СТС – часть системы, выделенная по определенному признаку, обладающая некоторой самостоятельностью и допускающая разложение на элементы в рамках данного рассмотрения. Для разделения СТС на элементы и подсистемы необходимо использовать метод декомпозиции (см. разд. 1.8 и 3.3). Внешняя среда в данном случае это пространство, в котором функционирует подсистема СТС.

Учет системных связей СТС (см. разд. 3.2) не всегда приводит к однозначному решению, однако в любом случае ряд полученных решений должен быть дискретным по техническим характеристикам, а количество членов ряда – конечным. Следовательно, результатом исследований подсистемы СТС должен быть конечный и дискретный ряд множеств требований к подсистемам комплекса, при выполнении которых заданная эффективность системы будет обеспечена. Решение задачи в такой постановке возможно при разработке частных и обобщенных критериев оценки подсистемы СТС и оптимизации параметров его отдельных подсистем комплекса с доказательством непротиворечивости каждого используемого критерия общему критерию эффективности (см. разд. 1.9 и 3.4).

В общем случае все действия могут быть условно разделены на элементарные действия  $A_i$  и противодействия  $Pr_j$ , выполняемые на  $l$ -м интервале развития операции. Результат действий элементов системы по объекту, оказывающему противодействие (и наоборот) характеризуется вероятностью определенного воздействия  $P_l$ .

Результат воздействия будем характеризовать определенным состоянием  $S_i$ , в которое переходит объект в результате выполнения действий.

Тогда вероятность такого состояния  $P_l$  можно представить в виде

$$P_l(S_i) = P[A_i, Pr_j, P_n, U_l],$$

где  $U_l$  – совокупность параметров, характеризующих условия на  $l$ -м интервале развития операции;  $P_n$  – надежность системы;  $i$  – количество элементов, подсистем, этапов;  $j$  – количество противодействий;  $A_i$  – элементарные действия;  $Pr_j$  – вероятность противодействия.

На рис. 72 приведена схема функционирования  $i$ -й подсистемы СТС.

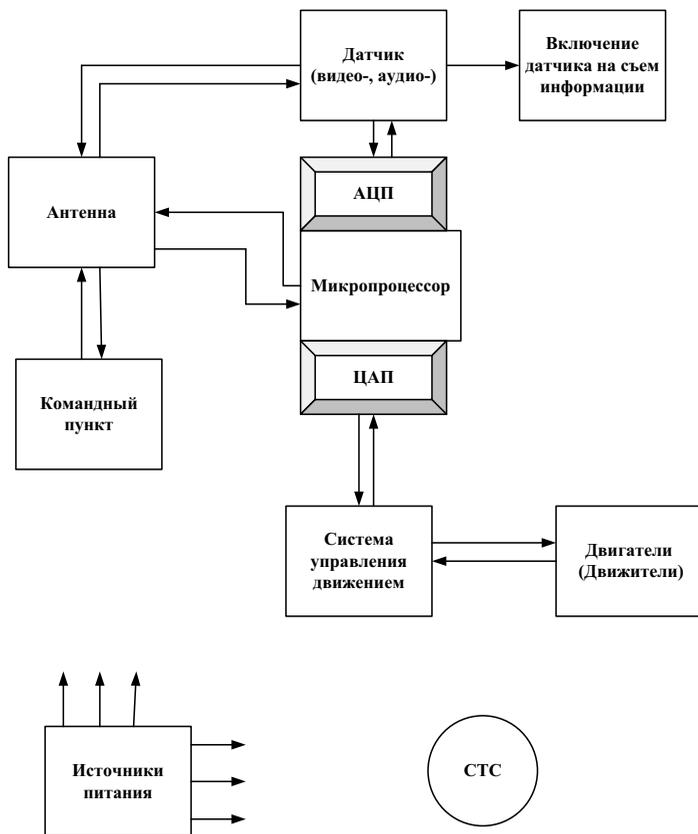


Рис. 71. Пример блок-схемы СТС

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

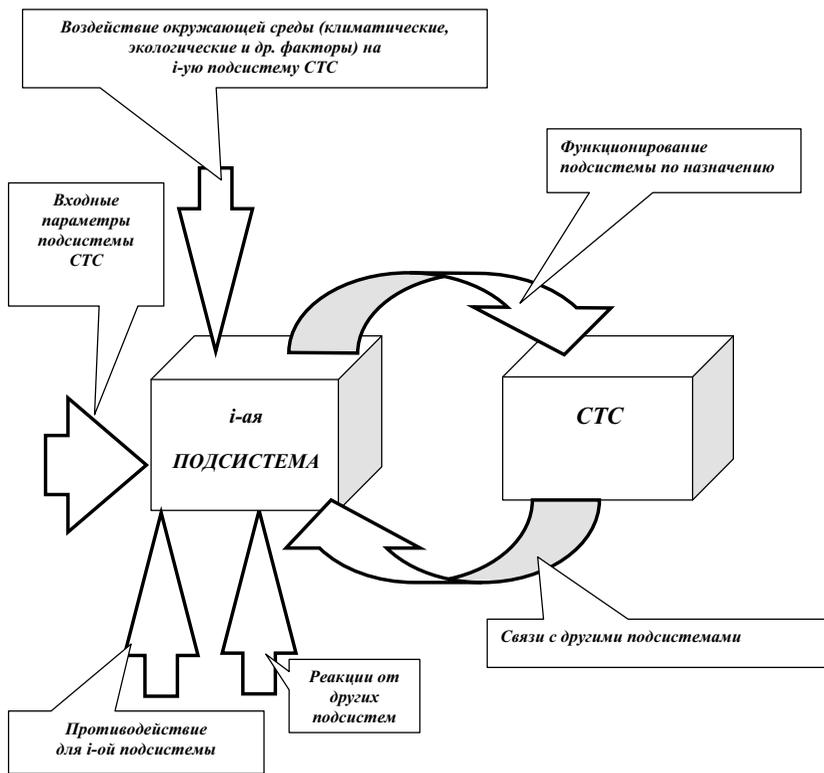


Рис. 72. Схема функционирования  $i$ -й подсистемы СТС

Таким образом, для учета противодействия необходимо записать функции  $Pr_j$  на всех этапах функционирования системы и затем воспользоваться приемами, приведенными в работах [1- 9].

Можно ввести **долевые показатели** функционирования подсистем и модулей СТС. Долевые показатели [58] характеризуют относительную важность выполняемых задач, а также величину долевого участия сил и средств при выполнении конкретной задачи.

Вклад подсистемы СТС в достижении цели

$$C_{\text{вкл.}} = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i},$$

где  $P_i$  – результат, выраженный в условных единицах, достигнутый  $i$ -й подсистемой СТС;

$n$  – количество подсистем (модулей) в составе СТС.

В работе [1] было введено определение вклада подсистемы в конечную эффективность системы. Это понятие можно использовать в качестве величины  $P_i$ .

Показатели производительности функционирования подсистемы СТС – характеризуют величину результата функционирования подсистемы (модуля) СТС, приходящегося на единицу средств ( $\Pi_N$ ), времени ( $\Pi_T$ ) и пространства ( $\Pi_V$ ). Физический смысл этих показателей состоит в оценке скорости изменения результатов во времени, пространстве и состоянии

$$\begin{aligned} \Pi_N &= \frac{P}{N}, & \Pi_T &= \frac{P}{T}, & \Pi_V &= \frac{P}{V}, \\ \Pi_N &= \frac{dP}{dN}, & \Pi_T &= \frac{dP}{dt}, & \Pi_V &= \frac{dP}{dV}, \end{aligned}$$

где  $P$  – результат деятельности;

$N$  – число средств, привлекаемых в деятельности;

$V$  – размеры пространства;

$T$  – время, в течение которого достигается результат.

Под вкладом можно понимать вклад системной связи, подсистемы, модуля, этапа выполнения задачи. (подробнее см. разд.4.7).

В Приложении Б приведен перечень БД системных модулей [2], позволяющих облегчить процедуру выбора критериев, показателей и пр. при проектировании подсистем СТС:

- БД «Структура СТС»;
- БД «Банк БД»;
- БД «Методы оптимизации»;
- БД «Критерии»;
- БД «Оценка риска»;
- БД «Результаты»;
- БД «Ограничения».

В состав показателей качества программного обеспечения входят

- БД «Показатели качества 1-го уровня»;

#### 4.2. Формирование перечня системных связей подсистем СТС

В соответствии с подходом, изложенным в главе 3, необходимо записать перечень системных связей для каждой подсистемы СТС. Ясно, что количество системных связей для  $i$ -ой подсистемы будет меньше, чем для СТС в целом. В данном случае присутствуют входные и выходные связи, информационные связи, связи защиты информации.

В разд. 3.2 приведен перечень информационных связей СТС, которые можно использовать при создании математической модели  $i$ -й подсистемы СТС.

На рис. 73 приведен возможный набор информационных связей подсистемы СТС.

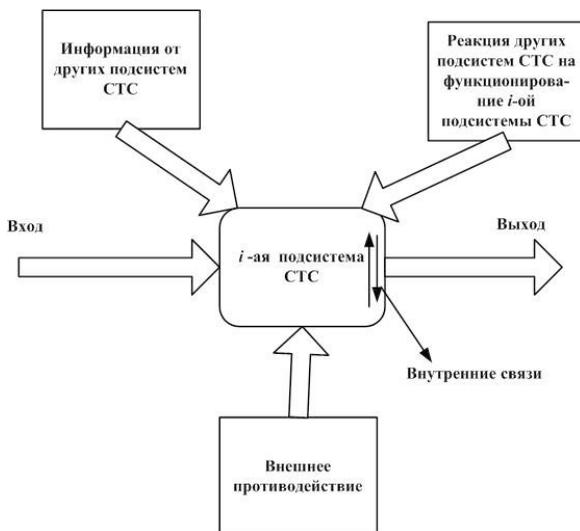


Рис. 73 Информационные связи  $i$ -ой подсистемы СТС

#### 4.3. Определение частных и обобщенных критериев эффективности подсистем СТС

В главах 1 и 3 были подробно рассмотрены критерии эффективности СТС (общий, обобщенные, частные). Основное при выборе критериев, как уже неоднократно отмечалось выше, необходимо соблюдение правила предпочтения, введенного в разд. 1.9. На рис. 74 приведена блок-схема выбора частных критериев оценки функционирования подсистем или модулей СТС.

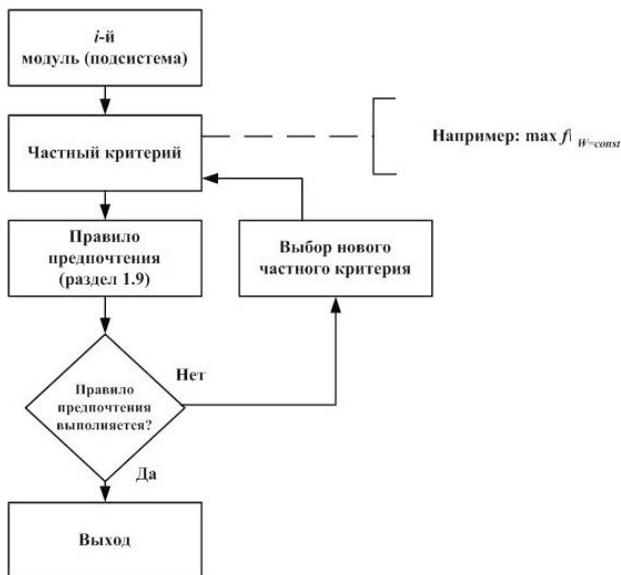


Рис. 74. Выбор частных критериев оценки эффективности подсистем или модулей СТС

Пусть общий критерий эффективности имеет вид  $\Xi = F(\alpha, \beta)$ , причем критерием  $i$ -го модуля является величина  $\mathcal{E}_i$ . Проверяется правило предпочтения:

$$k_{\text{пр}} = R(\mathcal{E}, \mathcal{E}_i),$$

$$k_{\text{пр}} = \begin{cases} 1, & \text{критерий } \mathcal{E}_i \text{ соответствует общему критерию и может использоваться} \\ 0, & \text{не соответствует} \end{cases}$$

Здесь  $R$  функциональная процедура по определению правила предпочтения, введенного в разд. 1.9. Если величина  $k_{\text{пр}} = 0$ , необходимо изменить критерий  $\mathcal{E}_i$ , исходя из анализа общего критерия  $\mathcal{E}$  и результатов  $R_1$  и  $R_2$ , где  $R_1 = \text{sign}\{\partial W / \partial \Psi\}$ ;  $R_2 = \text{sign}\{\partial \Psi / \partial K\}$ ,  $\text{sign}$  – знак числа выражения в скобках. Функции  $W$ ,  $\Psi$ ,  $K$  были введены в главе 1.

Заметим, что невозможность представления показателя эффективности  $W(\{\alpha\}, \{\beta\})$  в том виде, как это представлено в разделе означает невозможность построения одного обобщенного показателя, достаточного для сравнения вариантов. Представление критерия в виде  $W(\{\alpha\}, \{\beta\})$  эквивалентно сравнению вариантов по одному показателю. Таким образом, этот подход полностью дополняется спектральным методом

ранжирования альтернативных вариантов (см. разд. 2.1). Следовательно, записывая альтернативные варианты структуры СТС на всех 3-х уровнях, формируя матрицу характеристик и параметров для полученных вариантов, можно, используя метод ранжирования, получить наилучший вариант структуры СТС, а также матрицу расположения всех структур СТС по ранжиру. Проведение такой процедуры позволяет проверить полученные в результате проектирования варианты СТС и провести аналитический обзор вкладов параметров и характеристик СТС и его подсистем в общую эффективность системы.

Таблица 34. Критерии качества

Критерии	Общий критерий эффективности $K_0$	Примечание
Детерминированные	$K_0=1$ – задача выполнена; $K_0=0$ – задача невыполнена	Детерминированная модель
Вероятностные	$K_0=P_0$ – вероятность выполнения задачи	Стохастическая модель
Минимаксные	$K_0 = \min P_0$	Модели с априорной неопределенностью о характеристиках СТС и условиях применения

Таблица 35. Дуальность критериев

Критерий	Для СТС	Для подсистемы
Точность целеуказания	Частный	Общий для подсистемы целеуказания
Точность носителя	Частный	Общий для подсистемы «Носитель»

В табл. 34 приведены критерии качества СТС – детерминированные, вероятностные и минимаксные. В табл. 35 показана дуальность некоторых критериев, когда один и тот же критерий может быть частным критерием для СТС и общим для подсистемы. В табл.36 приведены обобщенные критерии, характеризующие эффективность подсистем СТС.

Таблица 36. **Обобщенные критерии, характеризующие подсистемы**

№ п/п	Наименование подсистемы	Критерии	Примечание
1	Данные об объекте слежения или наведения (для простоты обозначим – маяк)	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Точность определения области расположения маяков;</li> <li>— Точность определения координат маяков;</li> <li>— Информационные характеристики о маяках;</li> <li>— Закон распределения маяков на ограниченном участке земной поверхности</li> </ul>	Возможно задание любого из перечисленных критериев; в зависимости от этого используется соответствующая математическая модель
2	Носитель (самолет, вертолет, ДПЛА,БЛА,РТК)	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Зона достижимости;</li> <li>— Точность доставки в заданную область;</li> <li>— Предельный разброс параметров движения</li> </ul>	-
3	СТС	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Характеристики динамики движения;</li> <li>— Показатели точности</li> </ul>	-
3	СТС	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Параметры информационного блока;</li> <li>— Критерии помехозащищенности</li> </ul>	-
4	ИБ <ul style="list-style-type: none"> <li>— ИК</li> <li>— видео</li> <li>— ММ</li> <li>— АК</li> <li>— радиоконмандный</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Тип маяка (протяженный, точечный);</li> <li>— Модель фона и атмосферы (детерминированная, заданная предельными значениями, вероятностная в виде векторного многокомпонентного случайного поля с заданными характеристиками);</li> <li>— Характеристики помех;</li> <li>— Критерии системы обзора и поиска: параметры системы сканирования, вероятность попадания заданного маяка в поле зрения <math>P_{n1}</math>, вероятность попадания любого объекта в поле зрения <math>P_{n2}</math>, помехозащищенность;</li> <li>— Критерии системы обнаружения, селекции (пеленгации): вероятность правильного обнаружения заданного маяка <math>P_{об}</math>, вероятность обнаружения одного любого объекта из заданной совокупности, вероятность ложного срабатывания по фону <math>P_{лф}</math>, вероятность правильной классификации объектов и выделения объекта <math>P_{кл}</math></li> </ul>	-

5	СУ	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Начальные параметры: относительные координаты и дальность, скорость, углы траектории, углы атаки;</li> <li>— <math>V_{\max}</math>, <math>n_{\max}</math> СТС;</li> <li>— Возмущения, действующие на СТС: параметры турбулентности атмосферы, разброс аэродинамических и динамических параметров СТС;</li> <li>— Критерии динамики движения: располагаемые перегрузки <math>n_1</math>, <math>n_2</math> и связанные с ними зоны достижимости по координатам <math>X, Z</math>, углам траектории <math>\theta_B, \psi_B</math>, углам тангажа и рыскания <math>\nu_B, \varphi_B</math>; промах <math>r</math> и его координаты <math>x_{ip}, y_{ip}, z_{ip}</math> - max, min, МО, СКО, <math>F_i(x, y, z)</math>, плотность распределения промаха <math>f(x, z)</math>, <math>f(x, y)</math>, <math>f(x, y, z)</math>; коэффициенты чувствительности промаха к параметрам СТС;</li> <li>— Вероятность попадания СТС в заданную область местности</li> </ul>	— max, min, МО, СКО, $F(x, y, z)$
6	Маяки	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Число потерянных носителей с СТС</li> <li>— Число потерь СТС</li> <li>— Пропуск площади района</li> <li>— Перекрытие зон обзора ИБ</li> <li>— Площадь пересечения зон обзора непотерянных СТС</li> </ul>	-

К общим критериям эффективности СТС можно отнести вероятность выполнения поставленной задачи одним СТС а также математическое ожидание  $m$ , СКО, закон распределения  $f(x)$  - необходимого количества СТС для выполнения поставленной задачи.

Для одной СТС к общим критериям можно отнести вероятность попадания в объект, условную вероятность выполнения задачи при попадании в объект. К частным критериям следует отнести вероятности выполнения частных задач на различных этапах функционирования СТС: неуправляемое и управляемое движение, поиск, обнаружение и слежение за маяком.

При решении частных задач объект следует рассматривать как точечный или протяженный, расположенный на фоне при действии естественных помех. В общей постановке в качестве объекта следует рассматривать много компонентную систему при действии естественных помех.

Основными траекторными критериями характеризующими движение СТС в

динамике являются величины располагаемых перегрузок зоны достижимости ( $X = (X_{\max} - X_{\min}) \times Z = (Z_{\max} - Z_{\min})$ ), показатели точности: промах и его законы распределения, вероятность попадания в заданную область, коэффициенты чувствительности (частные производные) этих показателей к варьируемым параметрам системы.

К критериям информационного блока относятся: вероятность попадания  $P_{пз}$  в поле зрения маяка, вероятность ложного срабатывания по фону  $P_{лс}$ , вероятность правильного обнаружения  $P_{по}$ , вероятность ложной тревоги  $P_{лт}$ , вероятность устойчивого слежения  $P_y$  и вероятность срыва слежения  $P_c$  на заданном расстоянии до маяка.

Решающее правило характеризует вероятность правильного решения  $P_{пр}$  и вероятностями ошибок первого и второго рода  $L_1$  и  $L_2$ .

Критерии эффективности можно представить в виде функциональных зависимостей от параметров системы СТС, параметров характеризующих условия функционирования системы  $\{И\}$ , параметров метеоусловий и внешней обстановки  $\{b\}$ .

Численные значения критериев эффективности СТС определяются с использованием имитационных моделей различной сложности.

Такие подсистемы СТС как система целеуказания, носитель характеризуются сложным набором конструктивных параметров. При исследовании СТС следует выделить обобщенные характеристики взаимосвязывающие все эти подсистемы. На динамику и эффективность СТС существенное влияние оказывают условия старта, зоны достижимости носителя, показатели точности выведения носителя с СТС в заданную область.

На эффективность СТС оказывают влияние ее конструктивные и аэродинамические характеристики, показатели системы управления, характеристики информационного блока.

В число параметров информационного блока включаются параметры передаточных функций оптической системы, формирователя потока излучения, формирователя зондирующего излучения, анализатора изображения, усилительно-преобразующего тракта, системы сканирования, привода; закон сканирования, добротность привода, параметры датчика информации и решающего правила такие, как относительная спектральная чувствительность, интегральная чувствительность приемника излучения  $S_{и}$ , пороговая чувствительность  $\Phi_{п}$ , поле обзора  $H$ , полное поле зрения, поле зрения элемента разрешения, площадь входной апертуры  $A_{вх}$ , коэффициент передачи по потоку  $K_{п}$ , коэффициент спектрального пропускания  $T$ , коэффициент передачи по сигналу  $K_{эт}$ , пороги принятия решения, измеряемые параметры сигнала, характеристики точности их измерения, диапазон обрабатываемых угловых рассогласований и характеристики ошибки

отработки рассогласования .

Для решения задачи оценки эффективности СТС, обликотого проектирования требуется разработка имитационных моделей различного уровня сложности, исследование методов управления системой, разработка алгоритмов распознавания объектов и выделения заданной области объекта как при отсутствии так и, что особенно важно, при действии помех.

В качестве обобщенных критериев предлагаются следующие:

- для оценки точности выведения носителей в район доставки грузов - математическое ожидание потерь грузов, обусловленных рассеиванием относительно точки прицеливания;
- для оценки точности выведения груза в район доставки после вскрытия блока СТС - МО потерь грузов, обусловленных рассеиванием грузов блока ( $M_{гр}$ );

Приведенные частные и обобщенные критерии оценки функционирования СТС и ее подсистем могут быть дополнены в каждом конкретном случае необходимыми показателями. Важно при введении нового критерия соблюдать требования не противоречивости принятому основному критерию.

Для любой СТС можно исходя из физики процесса записать аналогичные обобщенные критерии. Важно, чтобы выполнялось соответствие определению обобщенного критерия, введенного в главе 1.

**Пример 4.1.** Для автомобиля на уровне надсистемы в качестве требований выступают:

- конкурентоспособность автомобиля;
- требования по экологии( хотя частично, они вошли в конкурентоспособность);
- требования ГИБДД;
- требования покупателя;
- требования торговых фирм.

#### 4.4. Методика проектирования подсистем СТС

Разработка системного метода исследования и проектирования подсистем СТС на основе применения обратных задач не имеет аналогов в литературе. Как отмечается в монографиях [1,2] имеются разрозненные подходы к теоретическому решению подобных задач. Исходя из предыдущего материала, следует, что принципы построения системного метода в данном случае очевидны:

- декомпозиция и составление БД уровней, модулей, блоков, узлов;
- составление БД критериев, ограничений, ТТХ отдельных подсистем и т.п.;
- проведение оптимизации всех модулей, входящих в БД системных блоков;
- разбиение общего критерия на составляющие и проверка правила предпочтительности (это наиболее сложный момент в проведении исследований);
- составление ряда альтернативных вариантов и проведение ранжирования.

При реализации указанной схемы, необходимо иметь в виду следующее:

- обязательно рассматриваются варианты, реализованные на существующей технологической базе, и перспективные технологии;
- вводится 10% разброс параметров альтернативных вариантов для удобства их реализации конструкторами;
- предусматривается процедура автоматического перехода от общей СТС к ее подсистеме, на 2-й уровень исследований;
- модули и блоки берутся для существующих изделий из каталогов и ассортимента предприятий, модернизируются из готовых блоков, разрабатываются вновь, но на существующей технологической базе, разрабатываются вновь, но с применением новых перспективных технологий и материалов.

При заданной схеме функционирования СТС на основе анализа всех системных связей определяется требуемый закон распределения величин для каждой подсистемы.

Экспертно или по прецедентам оценивается диапазон изменения СКО, например, подсистемы СУ  $[\sigma_{cy}^{\min}, \sigma_{cy}^{\max}]$  и для идеального управления определяется требуемый диапазон  $[P_{\min}, P_{\max}]$ .

Для оперативного и качественного проектирования подсистем СТС рекомендуется создать автоматизированную систему проектирования, включающую в себя собственную базу нормативно-технологических данных и базу материалов и комплектующих, информационно-аналитический блок, блок математического моделирования, блок формирования облика системы управления базами данных, блок научного моделирования, блок проектирования (рис. 75).

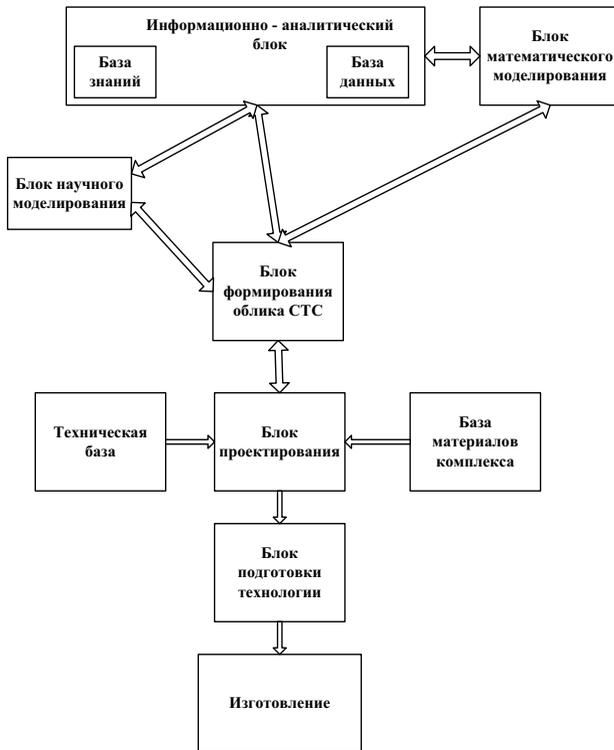


Рис. 75. Блок-схема автоматизированной системы проектирования

Если удастся найти прототип для  $i$ -ой подсистемы (модуля), то процесс проектирования имеет вид, показанный на рис. 76. На рис. 77 представлена обобщенная схема  $i$ -го этапа проектирования подсистемы СТС. На рис. 78 представлена блок-схема реализации задачи оптимального проектирования.

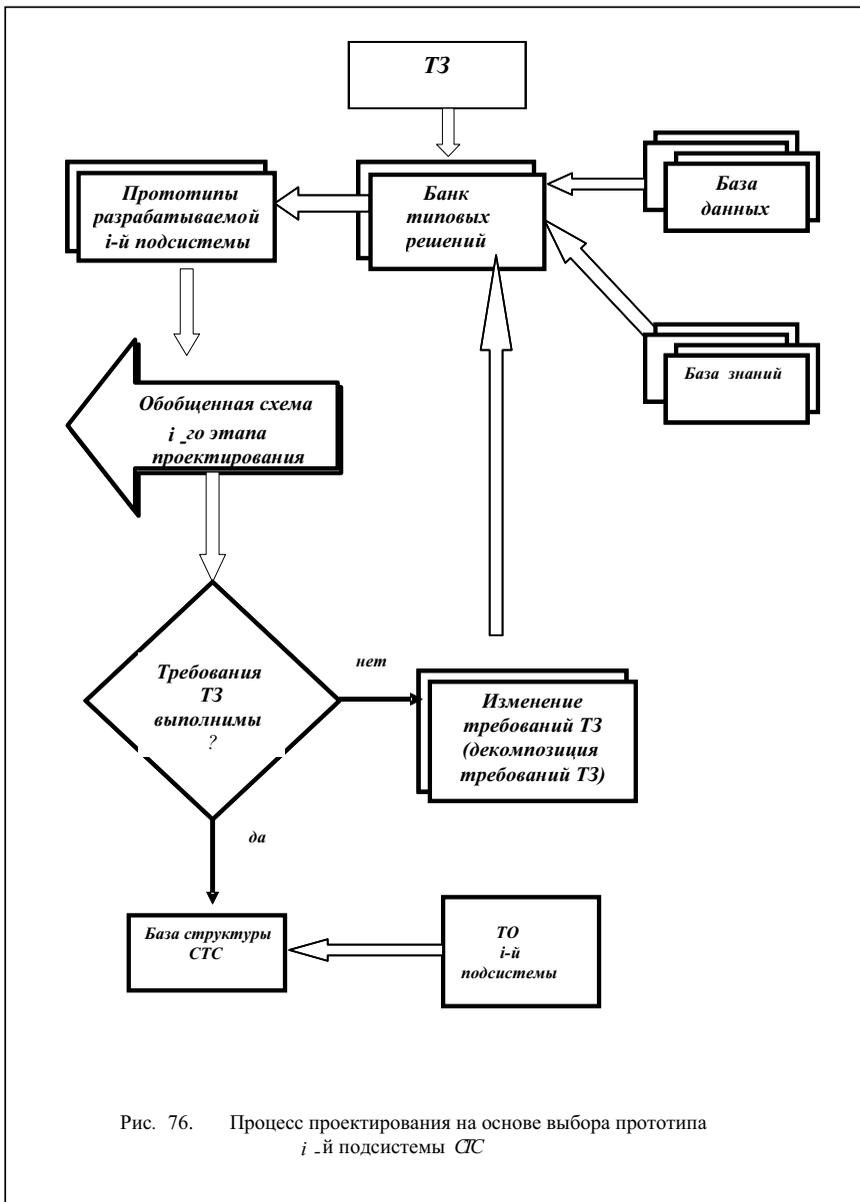


Рис. 76. Процесс проектирования на основе выбора прототипа  $i$ -й подсистемы  $СТС$

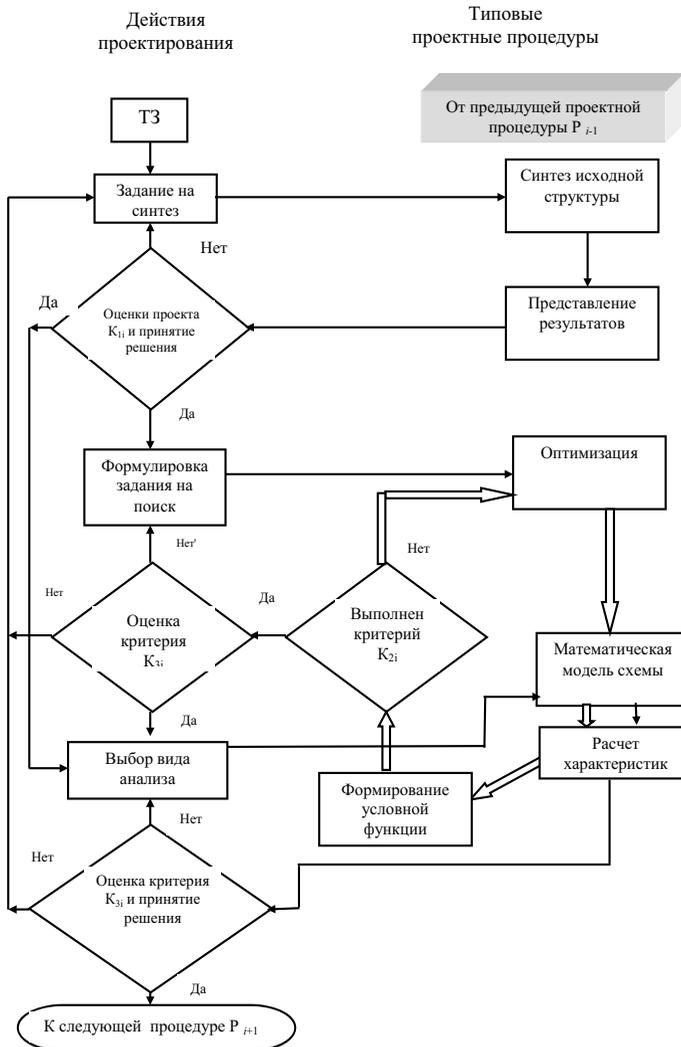


Рис.77. Обобщенная схема i-го этапа проектирования подсистемы СТС  
 $K_{1i}$  – заданный критерий;

$\rightleftarrows$  – контур поиска оптимального решения;

$K_{2i}$  – критерий оптимальности, представляющий собой правило предпочтения одного из вариантов другому (см. ранжирование вариантов), формируется целевая функция в зависимости от качественных показателей СТС;

$K_{3i}$  – дополнительный критерий оптимальности (ужесточенный вариант  $K_{2i}$ );

$K_{4i}$  – требование ТЗ.

Если ТЗ не удается реализовать, то принимается решение о корректировке ТЗ.

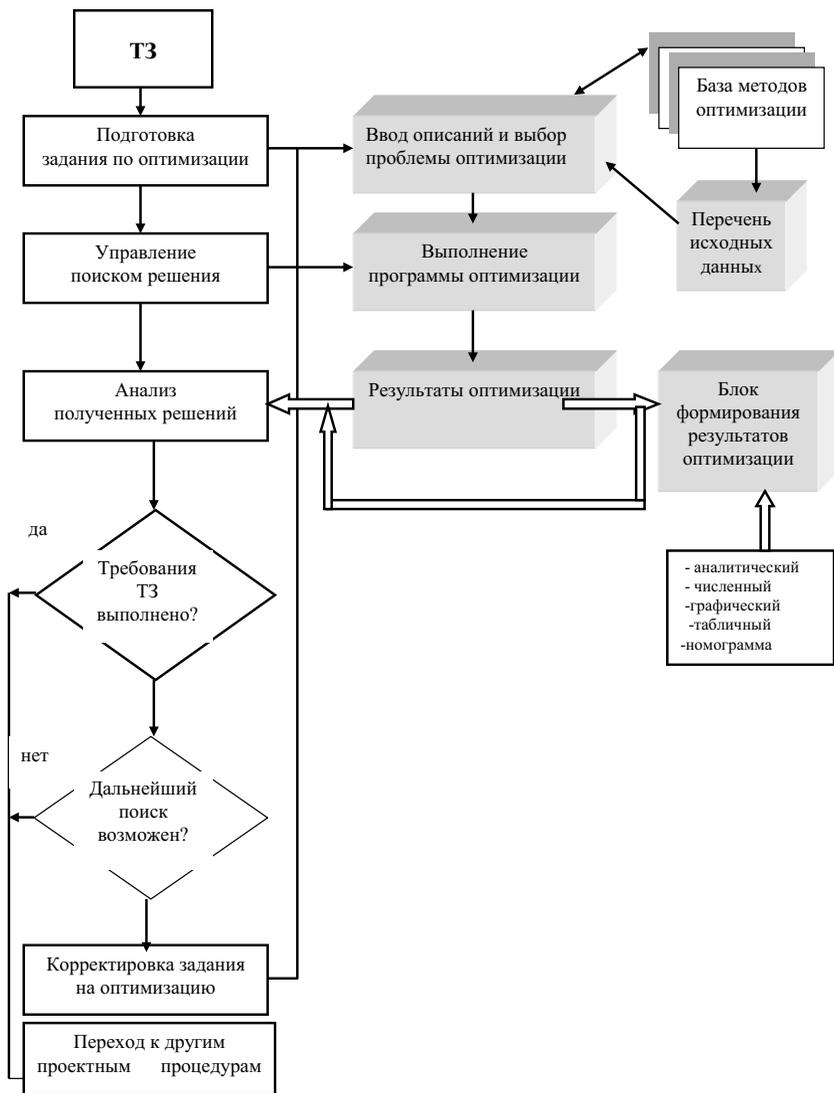


Рис. 78 Реализация задачи оптимального проектирования  
ППП – пакет прикладных программ

В заключение раздела рассмотрим применения оператора проектирования подсистем СТС, реализованные в виде команд и операторов комплекса прикладных исследований.

Оператор проектирования представляет собой условные обозначения программного модуля, реализующего какую-либо функцию исследования (например, ранжирования альтернативных вариантов, расчет теоретического закона распределения и т.п.). К таким оператором отнесем следующие операторы:

— оператор ранжирования  $Rg(M)$ , где  $M$  - матрица входной информации,  $M = \{m_{ij}\}$ ,  $i=1, \dots, k$ ;  $j=1, \dots, l$ ;  $k$  - число сравниваемых альтернативных вариантов (число строк матрицы),  $l$  - число параметров(характеристик). Оператор  $Rg$  реализует алгоритм, приведенный в разд. 2.1. Результатом действия оператора  $Rg$  над матрицей  $M$  будут две строки результатов:

— коэффициента ранжирования альтернативных вариантов СТС

$$K_p = Rg(M);$$

— вклады параметров в общую эффективность систем

$$V_{\text{вкл}} = Rg(M).$$

— коэффициент состояния предприятия (фирмы) будет иметь вид:

$$K_{\text{пред}} = Rg(M_{\text{ф}}),$$

где  $K_{\text{пред}}$  - коэффициент ранжирования предприятий (фирм).

Оценка риска  $K_p$  проводится с использованием матрицы  $M_p$ , включающей параметры: финансовое состояние предприятия; наличие валютного счета; степень зависимости от импортного сырья; степень зависимости от поставщиков; степень зависимости от транспорта (железнодорожного, автомобильного, авиа, морского и т.п.); степень наукоемкости продукции; уникальность оборудования; долговые обязательства предприятия.

Рассчитываются три коэффициента ранжирования:  $K_t$  - продукции, выпускаемой предприятием;  $K_{\text{ф}}$  - предприятий (фирм), выпускающей аналогичную продукцию;  $K_{\text{рс}}$  - риска выпуска продукции на конкретном предприятии. Полученные коэффициенты объединяются в новую итоговую матрицу

$$M_{\text{и}} = \{K_t \ K_{\text{ф}} \ K_{\text{рс}}\}^T.$$

Используя оператор ранжирования по критерию  $\text{rang}$  (отсутствие нормирования), получим  $K_{\text{и}} = Rg(M_{\text{и}})$ , где  $K_{\text{и}}$  - окончательный результат оценки функционирования предприятия, выпускающего данный вид продукции по сравнению с другими видами продукции, аналогичными предприятиями по выпуску подобной продукции и с оценкой риска выпуска такого вида продукции.

Введем оператор соответствия матрицы выборки  $A$  типовому закону распределения:

$F(x) = Rz(A)$ , где  $A$  – матрица выборки. Результатом операции будут параметры матрицы  $A$  и типовой закон распределения.

#### 4.5. Оптимизация параметров подсистем СТС

Возможные подходы к оптимизации были рассмотрены в разд.1.

Рассмотрим следующие случаи решения обратных задач при оптимизации подсистем СТС:

1. Оптимизация характеристик  $i$ -й подсистемы СТС (рис. 79)

— на основе различных данных (математических, экспериментальных, экспертных) записывается функция параметров  $i$ -ой подсистемы:

$$\alpha_i, \beta_i \longrightarrow P_i(\alpha_i, \beta_i),$$

— применяя любой известный метод оптимизации [40] (например, метод Фибоначи, метод Хука-Дживса, градиентные методы, метод перебора) определяются параметры, удовлетворяющие условию

$$|P_i^{\text{треб}} - P_i(\alpha_i, \beta_i)| < \varepsilon_0$$

. Это итерационная схема оптимизации.

2. Оптимизация характеристик  $j$ -ой подсистемы

$$D(F(\alpha_j, \beta_j)) = \min_{\sigma} \{ \max_{\alpha} | F_j^{\text{треб}} - F_j(\alpha_j, \beta_j) | \},$$

где  $D$  показатель критерия согласия Колмогорова;  $F_j^{\text{треб}}$  – эталонный оптимальный закон распределения величины;  $F_j(\alpha_j, \beta_j)$  – закон распределения в функции параметров  $j$ -ой подсистемы.

3. Оптимизация ресурсных характеристик  $k$ -ой подсистемы проводится по схеме, приведенной на рис.80, причем оптимизация проводится по итерационной схеме, либо по критерию согласия Колмогорова.

В каждом из перечисленных 3-х случаях составляется матрица оптимальных вариантов технических решений, которые ранжируются по способу, изложенному в разд. 2.1. По результатам ранжирования выбираются наиболее рациональные технические решения элементов, подсистем, СТС, которые могут быть рекомендованы для последующих этапов реализации, проектирования и испытаний.



Рис. 79. Схема оптимизации характеристик  $i$ -го подсистемы

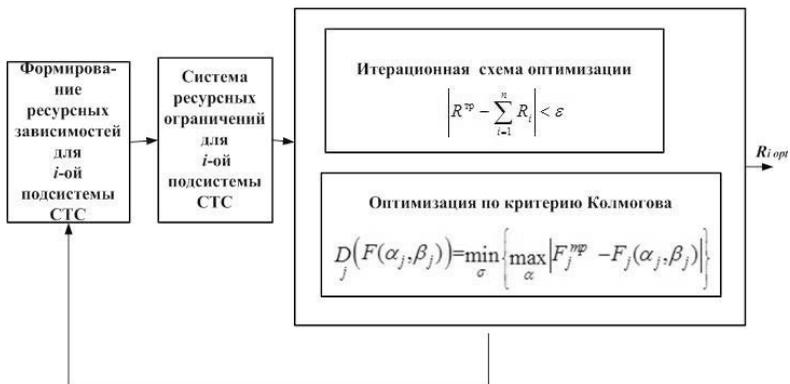


Рис. 80. Оптимизация ресурсных характеристик подсистемы СТС

$R_i$  - ресурсные характеристики  $i$ -ой подсистемы.

Для проектирования конкретных модулей на 3-м уровне предлагается следующая

процедура. Рассчитанные на 1-м и 2-м уровнях критерии  $P_i$  может быть использована как эталонная величина для 3-го уровня. Например, Рассчитанная на 1-м уровне, например, величина радиуса обзора СТС  $R_{opt}$  становится эталонной величиной для 2-го уровня, на котором в качестве критерия оптимизации можно выбрать следующий:

$$D = \min |P_{\Sigma}^{эм} - P_{\Sigma}(R^{opt}, d, n, \dots)|,$$

где  $P_{\Sigma}^{эм}$  - величина вероятности, найденная на 1-м уровне;  $P_{\Sigma}(R^{opt}, d, n, \dots)$  - функциональная зависимость вероятности от эталонного радиуса  $R$ , дальности обнаружения объекта, располагаемой перегрузки и других величин. В этом случае проверки по критерию эффективности проводить не требуется, т.к. эталонная вероятность выбрана исходя из выполнения этого критерия.

Заметим, что в случае отсутствия аналитических зависимостей можно записать функции и зависимости на основе интерполяции табличных величин, либо на основе обработки выходных величин отдельного модуля (блока) и определения закона распределения величин по методике, приведенной в Приложении А.

#### 4.6. Формирование технического облика подсистем СТС

По аналогии с подходом, изложенным в разд. 3. , на рис. 81 и 82 приведены блок-схема формирование ТО  $i$ -ой подсистемы СТС и схема детального представления  $i$ -ой подсистемы.

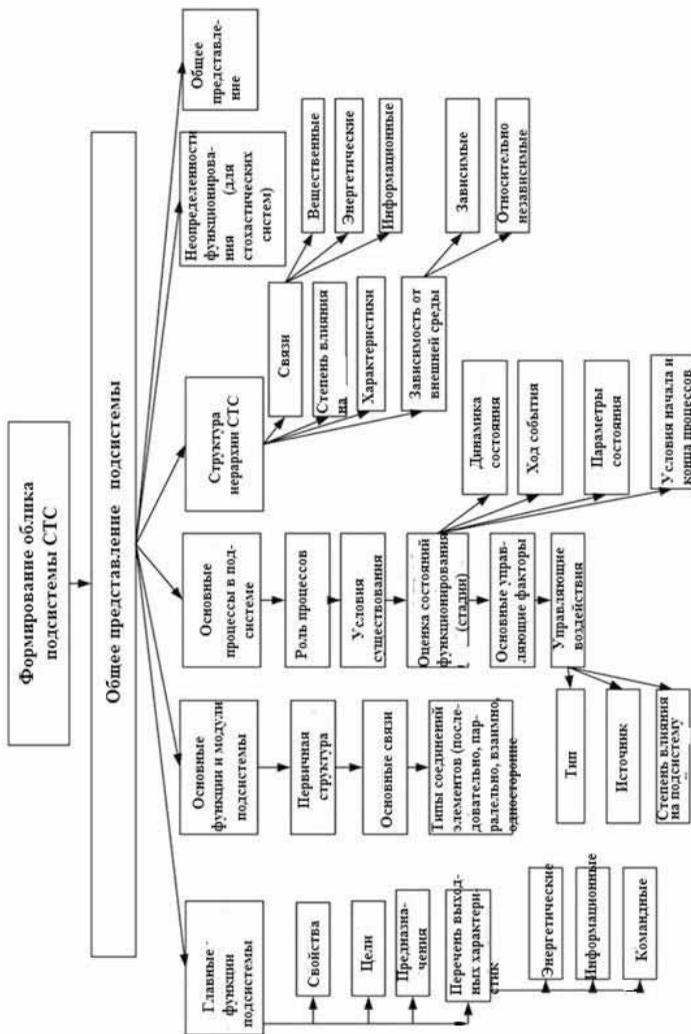


Рис. 81. Формирование ТО *i*-й подсистемы СТС

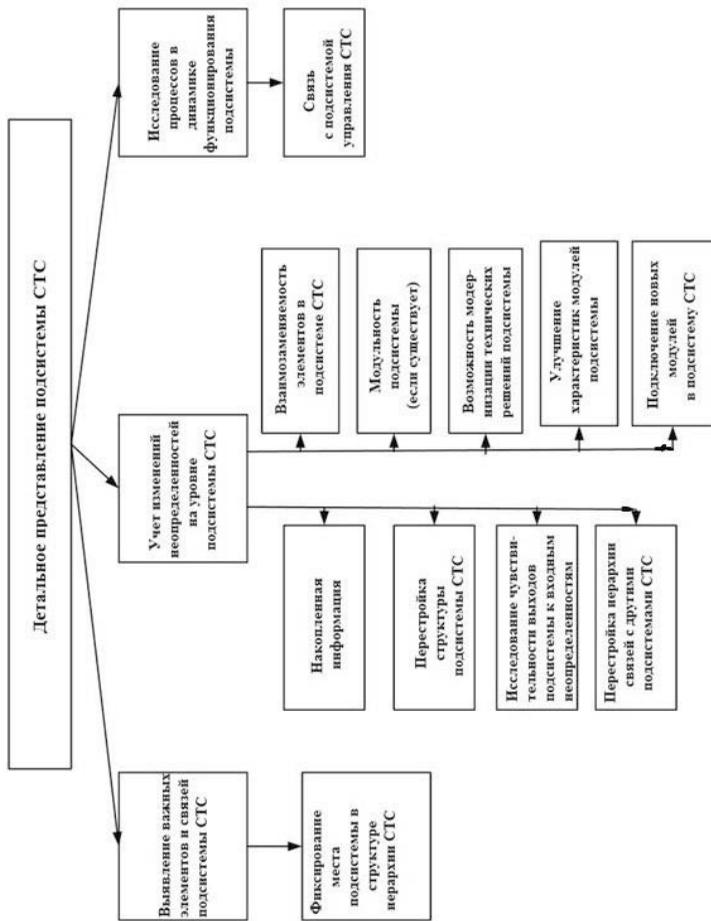


Рис. 82. Детальное представление подсистемы СТС

#### 4.7. Этапы оценки подсистем СТС

Оценка подсистем СТС имеет важное значение на всех этапах проектирования.

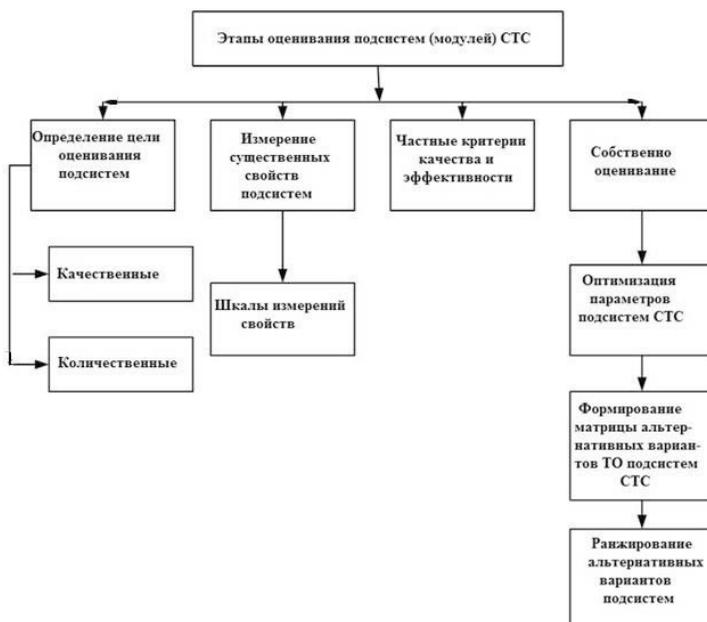


Рис. 83. Этапы оценивания

На рис. 83 приведена схема этапов оценивания подсистем (модулей) СТС. На этапе оптимизации параметров подсистем СТС формируется матрица альтернативных вариантов, на конечном этапе проводится оценка эффективности реально изготовленной подсистемы СТС на основе полученных характеристик.

В работах [1-40] приведены различные подходы к решению задачи оценки эффективности подсистем СТС.

Рассмотрим введенный авторами [1] подход оценки подсистем СТС на основе понятия вкладов.

Следует отметить, что понятие вкладов подсистем в общую эффективность

известно из литературы. Не следует путать с понятием вкладов, основанном на теории чувствительности.

**Пример 4.2.** Понятие вкладов проиллюстрируем на примере потерь воды, поступающей в квартиру (дом). Вклад  $V_{\text{ко}}$  – это потеря воды за счет протечек в трубопроводах, кранах, вентилях. Если  $V_{\text{ко}}=0,95$ , то потеря воды составляет 5% от общего объема, причем например, вклад 1-го трубопровода равен 1%, 2-го – 4%; потери за счет протечек кранов – 0,35% от общего объема протекающей жидкости.

Вкладом  $i$ -й подсистемы СТС будем называть долю общего числа СТС, необходимого для выполнения данной задачи. При этом вклад является дополнением к общему критерию «эффективность-стоимость» и характеризует ту часть средств, которая теряется вследствие ошибок данной подсистемы.

Если распределение ошибок, обусловленных характеристиками подсистем, подчиняется нормальному закону, тогда условный вклад  $i$ -го этапа (т.е. вклад этапа при условии отсутствия ошибок на других этапах) рассчитывается по формуле (для симметричного объекта)

$$\Delta N_i = N \left\{ 1 - \left[ 2\Phi\left(\frac{x_m}{\sigma_{ix}}\right) - 1 \right] \left[ 2\Phi\left(\frac{z_m}{\sigma_{iz}}\right) - 1 \right] \right\},$$

где  $\Delta N_i$  - условный вклад  $i$ -й подсистемы (в абсолютных единицах);  $N$  – число СТС, потребное для выполнения задачи;  $2x_m$ ,  $2z_m$  – размеры площадки, на которую осуществляется наведение СТС;  $\sigma_{ix}$ ,  $\sigma_{iz}$  – среднеквадратические отклонения (СКО)

ошибок, обусловленные характеристиками  $i$ -й подсистемы;  $\Phi(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\tau} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$  -

интеграл вероятностей.

Отношение  $\Delta N_i / N = \Delta N_{0i}$  назовем относительным условным вкладом  $i$ -й подсистемы. Если распределение ошибок нескольких подсистем подчиняются нормальному закону, из композиции нормальных законов следует, что совместный вклад  $j$  ( $j=1, \dots, l$ ) подсистем  $\Delta N_{\Sigma j}$  можно рассчитать по формуле для  $\Delta N_i$  при

$$\sigma_{ix} = \sigma_{\Sigma x} = \sum_{i=1}^j \sigma_{ix}^2; \quad \sigma_{iz} = \sigma_{\Sigma z} = \sum_{i=1}^j \sigma_{iz}^2.$$

В связи с тем, что условные вклады неаддитивны, их нормируют следующим образом:

$$\Delta N_i = \Delta N_i / \sum_{i=1}^n \Delta N_i.$$

Тогда относительный вклад  $i$ -й подсистемы равен  $\Delta\bar{N}_{0i}^n = \Delta N_i^n \Delta N_{0\Sigma}$ , а абсолютный вклад -  $\Delta N_i = \Delta\bar{N}_{0i}^n N$ .

Если ошибки  $j$ -й подсистемы распределены по равномерному закону на интервале  $(-l_i, +l_i)$  по каждой оси,  $i=x \vee z$ , то дифференциальный закон распределения СТС имеет вид

$$f(x, z) = \frac{1}{16l_x l_z} \left[ \Phi\left(\frac{x+l_x}{\sigma_{\Sigma x}}\right) - \Phi\left(\frac{x-l_x}{\sigma_{\Sigma x}}\right) \right] \left[ \Phi\left(\frac{z+l_z}{\sigma_{\Sigma z}}\right) - \Phi\left(\frac{z-l_z}{\sigma_{\Sigma z}}\right) \right].$$

Это выражение получено при условии  $m_x = m_z = 0$ , что, однако, не приводит к потере общности результата. При выполнении условия  $l_i < 2\sigma_{\Sigma i}$ ,  $i = x \vee z$  это выражение можно с относительной погрешностью не более 10% заменить нормальным законом распределения:

$$f(x, z) = \frac{1}{2\pi\tilde{\sigma}_{\Sigma x}\tilde{\sigma}_{\Sigma z}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\tilde{\sigma}_{\Sigma x}^2}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2\tilde{\sigma}_{\Sigma z}^2}\right)$$

где  $\tilde{\sigma}_{\Sigma i}^2 = \sigma_{\Sigma i}^2 + l_i^2 / 3$ ;  $i = x \vee z$ .

Подставляя найденные значения в формулу для  $\Delta N_i$ , находим вклад  $j$ -й подсистемы.

Порядок действий для определения влияния характеристик подсистем СТС на результат выполнения задачи заключается в следующем:

- в соответствии с задачей и требованиями разработчика СТС вводятся этапы функционирования системы;
- рассчитываются условные вклады подсистем, обеспечивающих выполнение каждого этапа;
- проводится нормирование условных вкладов и рассчитываются относительные и абсолютные вклады;
- проводится анализ полученных вкладов на предмет выполнения данной задачи;
- рассчитывается требуемое суммарное СКО  $\sigma_i$ , позволяющее выполнить данную задачу с заданными числом СТС;
- по результатам сравнения значения  $\sigma_{\text{треб}}$  со значением  $\sigma_i$  подсистем ( $i=1, \dots, n$ ) дается заключение об изменении характеристик рассматриваемых подсистем;
- при невозможности улучшения характеристик подсистем вводятся дополнительные этапы (например, радиокоррекция, самонаведение, автономное функционирование и т.п.);
- проводится поверочный расчет характеристик подсистем, реализующих введенную схему функционирования СТС с учетом дополнительных этапов.

Для общего случая, можно записать выражение вклада  $i$ -й подсистемы  $B_i$  ( $i=1, \dots, n$  – номер подсистемы СТС в виде

$$B_i = \left\{ 1 - \left[ 2 \int_{-\infty}^{x_m/\sigma_{ix}} f_{xi}(z_1) dx - 1 \right] \left[ 2 \int_{-\infty}^{z_m/\sigma_{iz}} f_{zi}(z_2) dz - 1 \right] \right\} \times \\ \times \frac{\left\{ 1 - \left[ 2 \int_{-\infty}^{x_m/\sigma_{\Sigma x}} f_{x\Sigma}(z_1) dx - 1 \right] \left[ 2 \int_{-\infty}^{z_m/\sigma_{\Sigma z}} f_{z\Sigma}(z_2) dz - 1 \right] \right\}}{\sum_{j=1}^n \left\{ 1 - \left[ 2 \int_{-\infty}^{x_m/\sigma_{jx}} f_{xj}(z_1) dx - 1 \right] \left[ 2 \int_{-\infty}^{z_m/\sigma_{jz}} f_{zj}(z_2) dz - 1 \right] \right\}},$$

где  $x_m, z_m$  - полуразмеры зоны попадания на объект;  $\sigma_i$  - СКО  $i$ -й подсистемы;  $\sigma_{\Sigma}$  - суммарная СКО системы;  $f(\cdot)$  - дифференциальный закон распределения случайных ошибок. Данное выражение получено в предположении, что объект симметричный. В случае несимметричности выражение будет иметь более сложный вид.

На практике обычно ограничиваются рассмотрением случаев, когда  $f_i$  представляет собой нормальный закон распределения, причем наиболее простой случай, когда  $\sigma_{ix} = \sigma_{iz} = \sigma_i$  и справедлив принцип композиции. Такие допущения позволяют построить таблицы для расчета вкладов и номограмм.

Введение понятия вкладов в процесс исследования СТС позволяет решить следующие задачи:

- оценить степень влияния функционирования  $i$ -й подсистемы СТС на степень выполнения конечной задачи; расчетом вкладов всех подсистем СТС формируются возможные пути коррекции схемы функционирования СТС за счет изменения параметров наиболее слабых подсистем;
- оценить чувствительность СТС к изменению тех параметров, которые являются основными с точки зрения характеристики функционирования  $i$ -й подсистемы;
- провести аналитическую оценку технического решения конкретной СТС на предмет выполнения требований по эффективности.

\*\*\*

В главе рассмотрены методы исследования подсистем и модулей СТС, дополняющий и поясняющий материал главы 3. Пример реализации конкретной подсистемы приведен в главе 6.

## Глава 5. ПРИМЕР ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ — САМОНАВОДЯЩАЯСЯ ПАРАШЮТНАЯ СИСТЕМА

В данной главе приводится пример проектирования самонаводящейся парашютной системы (СПС) на основе методик, приведенных в главах 1-4. Авторы специально делают некоторые повторы, чтобы разъяснить особенности применения системного анализа на примере проектирования конкретной сложной системы. В работах [1, 7, 8, 10-16, 21-23] подробно рассмотрены вопросы проектирования СПС. Этот материал является основой для построения материала данной главы.

### 5.1. Общее представление СПС

Согласно работе [8] цели и задачи, стоящие перед СПС следующие.

СПС может обеспечить следующие тактические характеристики:

- посадку в круг радиусом 20 м с центром в месте расположения маяка с вероятностью 0,999; в круг радиусом 10 м – с вероятностью 0,95; в круг радиусом 5 м – с вероятностью 0,9 ;
- вероятность обнаружения маяка – 0,99 на высотах поиска 700...1000 м и 0,95 на высотах поиска 500...700 м;
- в случае необнаружения маяка реализуется специальная команда управления, при которой промах относительно сброса равен 1000...140 м;
- масса полезного груза: 100 кг, 500 кг, 2 т (10 т в перспективе). Массу полезного груза можно увеличить путем сброса сразу нескольких парашютных систем на один маяк.

Маяки, на которые может наводиться СПС

- специальные: пиротехнические трассеры, лампы и т.п.;
- выполненные из подручных средств: костер, горящее ведро солянки, зеркало, автомобиль с разогретым мотором и т.п.;
- естественные: нагретые солнечным излучением предметы на поверхности земли или воды, например, бакен на реке, кусок металла на земле и т.п.;
- объекты, имеющие собственное излучение, например, Чернобыльская АЭС.

Носителями СПС могут быть самолеты АН-24, ИЛ-76, ТУ-95, ИЛ-38 (или их современные аналоги) и вертолеты МИ-6, МИ-8.

#### Ограничения на применение СПС

- применение СПС возможно при скорости ветра не выше 12 м/с в диапазоне применяемых высот;
- обнаружение и поиск маяка должны происходить ниже границы облачности (для ИК и видимых систем).

#### Требования, предъявляемые к СПС

- увеличение дальностей действия СПС;
- повышение точности доставки при широких диапазонах изменений внешних условий;
- всепогодность;
- всесуточность;
- простота в эксплуатации;
- использование утилизируемых изделий.

Десантирование СПС с самолета обеспечивается, например, методом механизированного выбрасывания транспортером через грузовой люк самолета. При отделении системы от самолета вытяжным звеном вводится в действие основной парашют с системой управления.

На основании экспериментальных данных стабилизация СПС совпадает с моментом полного раскрытия основного планирующего парашюта. Время от сброса до момента стабилизации находится в диапазоне 6...14 с, при этом потеря высоты составляет 150-300 м, расстояние от точки сброса по направлению полета 400...600 м.

Режим поиска начинается с момента стабилизации СПС путем сканирования подстилающей поверхности по сходящей спирали до момента обнаружения и захвата маяка. Закон сканирования выбирается из условия осмотра подстилающей поверхности без пропусков в телесном угле с углом полураствора  $20^\circ$  и с учетом ветрового сноса СПС (для ИК канала).

Сигнал коррекции СПС пропорционален угловой скорости линии визирования маяка. Возможны различные варианты решения вопроса обнаружения маяка

- если маяк имеет заведомо больший тепловой контраст, чем фон, то в процессе поиска определяется максимум облученностей, затем происходит автоматическая установка порогового значения сигнала коррекции (для ИК канала) в блоке обнаружения по максимуму облученностей и осуществляется повторный поиск и захват маяка;
- если необходимо осуществить поиск и захват естественного маяка с заранее неизвестным тепловым контрастом по отношению к фону, то носитель (самолет)

оборудуется индикаторным информационным блоком (ИБ), съюстированным с теле (видео-) камерой. После идентификации маяка оператор выставляется пороговое значение ИБ;

- Для повышения помехоустойчивости системы целесообразно использовать дополнительно акустический канал, работающий по звуковому каналу.

Наиболее предпочтительным является вариант захвата и автосопровождения маяка непосредственно на носителе с последующим сбросом СПС. Этот вариант обеспечивает максимальную вероятность обнаружения, но при этом необходимо решить техническую проблему, связанную с исключением срыва слежения за маяком в момент сброса.

Алгоритм управления СПС строится на основе информации о параметрах линии визирования маяка в пространстве, которую можно получить, например, с ИК-канала ИБ, а также возможности создания управляющих перегрузок для СПС с помощью затягивания строп управления. Схема управления парашютом предусматривает использование двух строп управления (левой, правой), заведенных, соответственно на исполнительные механизмы контейнера управления. Управление осуществляется путем подтягивания строп управляющих парашютов (одной или обеих), вызывающего отклонения участков задней кромки, что приводит к возникновению дополнительных управляющих сил и моментов.

В качестве исходной информации для системы управления СПС используются следующие физические величины (для ИК-канала ИБ) [10,21,22]

- две составляющие угловой скорости визирования маяка, получаемые с ИБ в виде сигналов коррекции;
- две составляющие угла пеленгов связанной с ИБ системы координат.

Дополнительной информацией для выработки команд управления является число проходов над маяком (в пределах угла пеленга  $3^{\circ}$ ).

Процесс наведения на маяк состоит из трех этапов:

- выведение СПС в область местной вертикали к точке размещения маяка с двумя проходами над ним;
- разворот СПС курсом от маяка, выбор оптимального угла планирования СПС и разворот курсом на маяк;
- сближение СПС с маяком по траектории с оптимальным углом планирования к плоскости земли.

В момент прохода над маяком срабатывает счетчик, состояние которого увеличивается на единицу, после чего отключается управление по угловой скорости линии визирования и начинается разворот СПС.

Для выполнения мягкой посадки может быть осуществлен маневр так называемого «подрыва». Для этого на СПС установлен высотомер, по сигналу с которого на определенной высоте перед посадкой затягиваются обе стропы управления на оптимальную длину. При этом вертикальная скорость уменьшается на 24...45%, а горизонтальная на 30...60%, перегрузки при приземлении не превышают 25 ед. по вертикальной оси, 2 ед. в горизонтальной и 10 ед. в боковом направлениях в течение примерно 0,2 с.

Посадка может быть организована со смещением на заданное расстояние от маяка путем введения в систему управления СПС специальной схемы смещения. Это может потребоваться для того, чтобы не допустить посадку прямо на маяк, если маяком является костер.

После выброса из носителя СПС представляет собой систему из трех тел: парашютной платформы с установленным на ней блоком обнаружения, командным блоком с размещенным на ней грузом, контейнера управления с источником питания и приводом управляющих строп, и планирующего парашюта.

Система управления включает в себя три контура управления:

- большой контур, объектом управления которого является СПС;
- средний контур, объектом управления которого является ИБ;
- малый контур, объектом управления которого является следящий гироскоп информационного блока (ИК-канал).

В состав СПС входят серийный стабилизирующий парашют и основной планирующий парашют УПГ-01.

Элементы подвесной системы выполнены из капроновых лент, имеющих прочность на разрыв 50000 Н при относительной деформации 30%. Ориентировочная величина суммарной жесткости этих элементов на растяжение 300 кН/м.

Блок обнаружения в виде ИК-канала имеет размеры 250x250x350 мм при массе 5 кг. Блок закрывается пылевлагонепроницаемым кожухом и размещается на парашютной платформе. В одном из вариантов СПС этот блок имеет следующие характеристики: спектральный диапазон 2,5...3,0 мкм; поле зрения – 90°; порог облученности от АЧТ 300°С – 20 нВт см<sup>2</sup>, угол прокачки ротора гироскопа – 40°.

Области применения СПС :

- доставка грузов в районы стихийных бедствий;
- доставка грузов (продуктов, приборов, оборудования) геологам, полярникам, горноспасателям и т.п.;
- оперативная доставка медицинских грузов для зараженных районов;

- доставка грузов для МЧС;
- военное применение СПС;
- доставка грузов на море, в тундре, горах, тайге;
- облет нефтепроводов в нефтяной и газовой промышленности для выявления утечек нефтяных продуктов, несанкционированного подключения других пользователей;
- разведка новых районов;
- контроль параметров атмосферы и ландшафта в труднодоступных районах земной поверхности;
- применение СПС службами МВД;
- доставка роботов в район их функционирования;
- ретрансляция управляющих команд и видеоинформации при пролете по траектории и опрос расположенных на земной поверхности датчиков;
- движение по заданной траектории (например, окружности) для управления группой робототехнических систем, расположенных в опасных для человека районах земной поверхности;
- деактивация зараженных местностей земной поверхности;
- доставка и разброс датчиков (например, в пустыне);
- применение в интересах туристических фирм.

Возможны различные варианты построения системы СПС:

- одноразовой доставки одной СПС без ее возвращения на склад;
- многократной доставки одной или нескольких платформ с возвращением использованных на склад;
- доставки нескольких платформ без возвращения.

На рис. 84 приведена возможная схема полета СПС.

Предлагаемая конструкция СПС имеет новое качество по сравнению с зарубежными системами: высокую точность и автономность применения в сочетании с возможностью наведения на маяки, сделанные при необходимости из подручных средств. Маяками для таких систем могут быть костер, горящая бочка с соляжкой, прожектор, звуковая сирена и т.п.

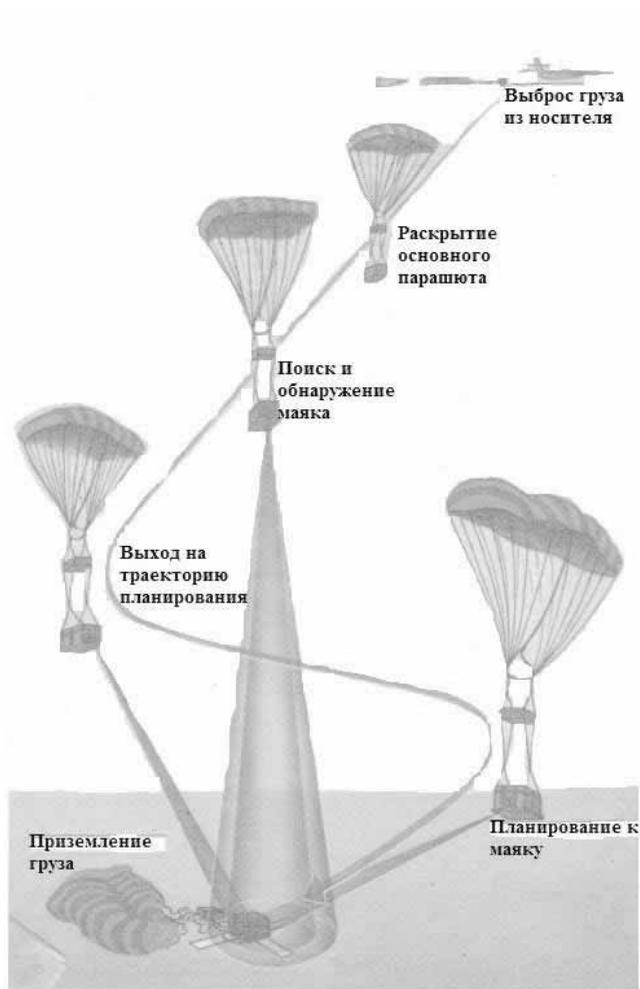


Рис. 84. схема полета СПС

## 5.2. Формирование перечня системных связей СПС

На рис.85 приведена блок-схема иерархической структуры задач для СПС. Следует иметь в виду, что исходя из триединства задач, введенных в главах 1,3,4 для СПС это будет:

- уровень СПС – подсистема носителя;
- СПС – как автономная система;
- СУ, ИБ, ИО – подсистемы СПС.



Рис. 85. Иерархическая структура задач СПС

На рис. 86 и 87 приведен перечень тактических и проектных параметров СПС.



Рис. 86. Перечень тактических параметров для СПС



Рис. 87. Перечень проектных параметров для СПС



Рис. 88. Системные связи СПС

На основе анализа системных связей СПС (рис.88) сформирована схема учета различных групп ошибок СПС (рис. 89).

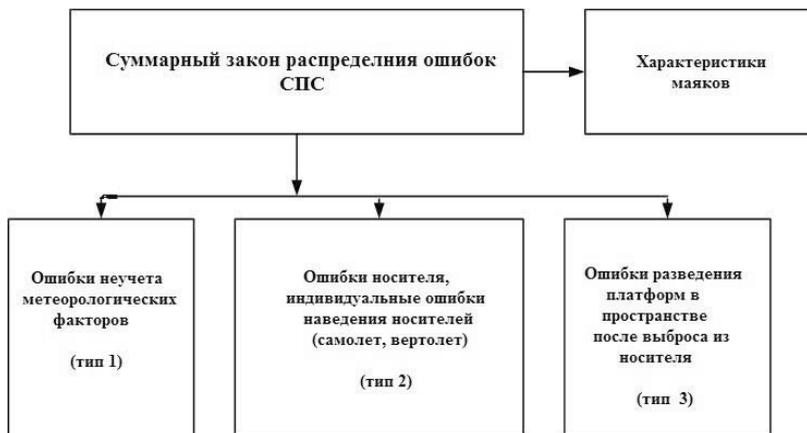


Рис. 89. Составляющие суммарного закона распределения ошибок СПС

### 5.3. Декомпозиция СПС

В соответствии с введенной в разд. 3.3 стратегиями декомпозиции, выберем комбинацию функциональной и структурной декомпозиции.

Исходя из структурной декомпозиции (см. главу 3) представим структуру СПС, как это показано на рис. 90.

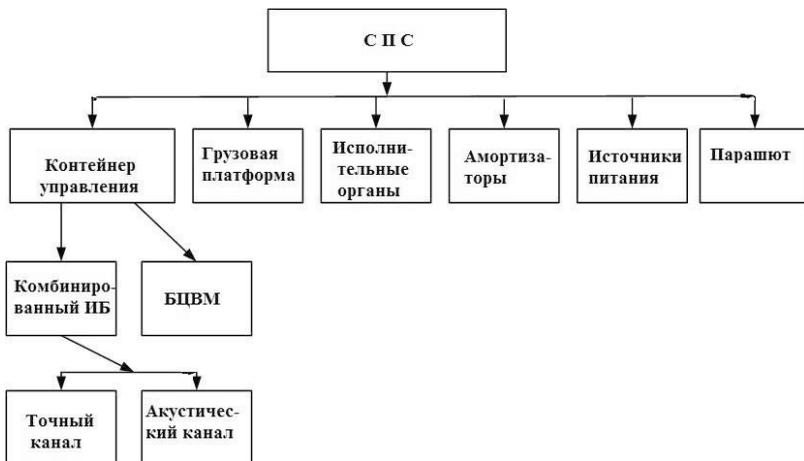


Рис. 90. Декомпозиция структуры СПС

Парашют, грузовую платформу и амортизаторы выбирают из существующих типов, исходя из массы платформы и условий применения. Контейнер управления проектируется для решения заданной конкретной задачи. Точный канал реализуется на базе утилизируемых ГСН существующих боеприпасов, например, ИК канал или мм канал.

Акустический канал разрабатывается по методикам, приведенным в работах [7, 8, 37-39].

#### 5.4. Разбиение общего критерия эффективности на подсистемы

Запишем общий критерий эффективности СПС в виде  $U = f(P_{\Sigma}, R, F, H, \dots)$ ,

причем  $P_{\Sigma} = P_0 P_n P_{\Gamma}$ .

$P_{\Sigma}$  - суммарная вероятность попадания СПС в маяк при условии его нахождения в зоне обзора СПС;

$R$  - радиус зоны обзора ИБ;

$F$  - закон распределения выходной величины;

$H$  - высота полета СПС;

$P_0$  - вероятность обнаружения маяка;

$P_n$  - вероятность наведения на маяк;

$P_{n1}$  - вероятность попадания зоны обзора ИБ на площадь маяков в маяк.

Для случаев, когда  $F$  можно считать нормальным с математическим ожиданием  $M_x=M_z=0$  и дисперсиями  $\sigma_x^2, \sigma_z^2$ , определяемыми точностью средств целеуказания, ошибками доставки и рассеивания СПС из кассет, функция примет вид:

$$\psi(R_x, R_z) = \frac{1}{N_n} \left[ 2\Phi\left(\frac{x_m + R_x}{\sigma_{\Sigma_x}}\right) - 1 \right] \left[ 2\Phi\left(\frac{z_m + R_z}{\sigma_{\Sigma_z}}\right) - 1 \right] \gamma P(M) P(A_1 / B_1) P_{n1},$$

где

$$P(N_1) = N_n / N_{\Sigma}; \quad P(A_2) = (N_{\Sigma} - N_n - N_{л}) / N_{\Sigma},$$

$$P(A_3) = N_{л} / N_{\Sigma},$$

$N_n, N_{л}$  - число истинных и ложных маяков в зоне обзора;  $N_{\Sigma} = S_{30} / S_{пз}$  - число полей зрения в зоне обзора ИБ;  $S_{30}, S_{пз}$  - площади зоны обзора и поля зрения датчика маяка;

$$N_n = \begin{cases} m \frac{R_x R_z}{(x_m + R_x)(z_m + R_z)} & \text{при } \geq 1; \\ 1 & \text{при } < 1 \end{cases};$$

$$P(M) = 1 - (1 - P_{пю})^{N_n} (1 - P_{лт})^{N_{\Sigma} - N_n - N_{лм}} (1 - P_{лм})^{N_{лм}},$$

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \text{при } N_n \geq 1; \\ N_n & \text{при } N_n < 1; \end{cases}$$

$$P_{n1} = \frac{1}{m} \frac{(x_m + R_x m_x)(z_m + R_z m_z)}{(x_m + R_x)(z_m + R_z)}$$

Для простоты выкладок предполагается

- коэффициент корреляции ошибок доставки грузов по осям OX, OZ  $r < 0,15$  и можно применять свертку законов распределения случайных величин;
  - вероятность попадания  $P(x_n, z_n)$  для одного носителя в блоке платформ не меняется;
  - оси рассеивания эллипсов и координатные оси группы маяков параллельны.
- Окончательно в качестве критерия выберем выражение

$$P = P_{non} P_{\Sigma} = P_{\Sigma} \left[ 2\Phi\left(\frac{x + R}{\sigma_x}\right) - 1 \right] \left[ 2\Phi\left(\frac{z + R}{\sigma_z}\right) - 1 \right].$$

Здесь  $\Phi$  – интеграл вероятности,  $\sigma_x, \sigma_z$  - СКО по осям OX, OZ.

В качестве ограничений выступают пределы изменения параметров подсистем СПС, определяемые из условия технической реализуемости.

Правомочность выбора такого критерия определяется из материалов раздела 1.9.

Пусть функция

$$\psi [K(\alpha)] = \Phi_y K(\bar{\alpha}) = P_{\Sigma} P_{\text{поп}},$$

где  $\bar{\alpha}$  - вектор параметров подсистем СПС, тогда согласно теории исследования операций из формулы

$$N = \sum_{i=1}^{m_m} \left[ 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \psi_j) \right]$$

имеем, что  $\frac{\partial N}{\partial \psi} > 0$  и  $\frac{\partial \psi}{\partial K} = 1 > 0$ .

При заданном числе СПС (обратная задача) для сравнения альтернативных вариантов следует использовать обобщенный показатель  $K(\bar{\alpha}) = P_{\Sigma} P_{\text{поп}}$ , причем для наилучшего варианта  $K(\bar{\alpha})$  должно быть максимальным.

В качестве обобщенных критериев предлагаются следующие:

- математическое ожидание потерь грузов, обусловленных рассеиванием относительно точки прицеливания  $M_{\text{кас}}$  – для оценки точности выведения носителей в район доставки грузов;
- математическое ожидание потерь грузов, обусловленных рассеиванием грузов блока  $M_{\text{пр}}$  – для оценки точности выведения груза в район доставки после вскрытия блока СПС;
- математическое ожидание пропуска площади района  $M_{\text{пр}}$  – для оценки степени выполнения задачи накрытия всего района доставки зонами обзора ИБ;
- математическое ожидание перекрытия зоны обзора ИБ над одним маяком  $M_{\text{зо}}$  - для оценки возможности посадки груза на маяк, попавший в зону обзора одного (или нескольких) грузов.

Расчет введенных обобщенных критериев проводится при следующих допущениях:

- **блок** считается «потерянным», если ни один из грузов, входящих в него, не накрывает площадь маяка зонами обзора, т.е.

$$\{C\} \cap_j \{Z_j\} = 0,$$

где  $\{C\}$  – множество точек площади района доставки;

$\{Z_j\}$  - множество точек, принадлежащих зонам обзора грузов;

$j$  - число грузов в кассете;

- **груз** считается «потерянным», если он принадлежит непотерянному блоку, но его зона обзора не попадает на район доставки, т.е.

$$\{C\} \cap_j Z_j = 0;$$

- **район доставки** считается «пропущенным», если он не покрыт ни одной из зон обзора всех грузов:

$$\sum_{j=1}^N [\{C\} \cap \{Z_j\}] = 0.$$

Введенные критерии для качественного сравнения альтернативных вариантов систем правомочны вследствие их непротиворечивости общему критерию «эффективность - стоимость»: однозначное изменение обобщенного показателя ведет к однозначному изменению общего.

С учетом, например, того, что рассеивание кассет подчиняется нормальному закону, получим:

$$M_{\text{кас}} = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_z} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_0 \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{x-\bar{x}}{\sigma_x} \right)^2 + \left( \frac{z-\bar{z}}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} dx dz,$$

где  $S_0$  - доля площади рассеивания кассет, покрываемая зонами обзора потерянных блоков;

$\sigma_x, \sigma_z$  - среднеквадратическое отклонения блоков по осям  $OX$  и  $OZ$  соответственно;

$\bar{x}, \bar{z}$  - математическое ожидание центра рассеивания блоков.

Начало системы координат совпадает с точкой прицеливания.

Если площадь района доставки превышает площадь рассеивания блоков, то  $S_0 = 0$ , и, следовательно,  $M_{\text{кас}} = 0$ . Если маяк точечный и находится в точке прицеливания, то  $S_0 = 1$  и, следовательно,  $M_{\text{тр}} = 1$ .

Согласно определению потерянного груза

$$M_{\text{зп}} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_1 \varphi(x, z) dx dz,$$

где  $S_1$  - доля площади рассеивания блоков, покрываемая зонами обзора потерянных грузов, входящих в состав непотерянных блоков;

$\varphi(x, z)$  - закон распределения грузов блоков на высоте начала работы ИБ.

Математическое ожидание потерь грузов с учетом потерь блоков

$$M_{\Sigma} = 1 - (1 - M_{\text{кас}})(1 - M_{\text{сп}}),$$

где  $M_{\text{кас}}$  и  $M_{\text{сп}}$  – относительные величины ( $\leq 1$ ).

Аналогично запишем выражения для  $M_{\text{пр}}$  и  $M_{\text{зо}}$ , считая, что маяки распределены в районе доставки случайно по закону  $\varphi_m(x, z)$ :

$$M_{\text{пр}} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_3 \varphi_m(x, z) dx dz;$$

$$M_{\text{зо}} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_4 \varphi(x, z) dx dz,$$

где  $S_3$  – площадь маяков, не покрытая зонами обзора грузов;

$S_4$  – площадь пересечения зон обзора;

$$S_4 = \bigcap_{j=1}^n S_j; \quad S_j = \frac{1}{2} \int_{\text{зо}_j} \left( x_j \frac{dz_j}{dt} - z_j \frac{dx_j}{dt} \right) dt,$$

$S_j$  – параметрическое задание огибающей зоны обзора ИБ груза;

$\text{зо}_j$  – параметры зоны обзора  $j$ -го ИБ.

Расчет приведенных показателей проводится на ЭВМ методом статистического моделирования. Приведенные частные и обобщенные критерии оценки функционирования СПС и ее подсистем могут быть дополнены в каждом конкретном случае необходимыми показателями. Важно при введении нового критерия соблюдать требования непротиворечивости принятому основному критерию.

## 5.5. Методы проектирования СПС

Системный подход к решению задачи выбора параметров СПС состоит в следующем:

рассчитываются требуемые характеристики СПС:  $n$  – число СПС в блоке;  $F(x, z)$  – закон распределения СПС в пространстве после их разделения из блока;  $P_{\Sigma}$  – вероятность попадания в маяк при условии его нахождения в зоне обзора,  $R_{\text{зо}}$  – радиус зоны обзора ИБ СПС.

На втором уровне рассчитываются характеристики отдельных подсистем:

- $P_{\text{по}}$  – вероятность правильного обнаружения;
- $P_{\text{лт}}$  – вероятность ложных срабатываний ИБ;

—  $P_{\text{нав}}$  – вероятность наведения на маяк.

На последующих этапах рассчитываются характеристики каждой подсистемы СПС. Для СУ – это  $F_{\text{пон}}(x, z)$ - закон распределения точек попадания в район маяка;  $\sigma_{\text{пон}}$  – среднеквадратическая ошибка попадания (наведения); потребные и располагаемые перегрузки, тип и метод управления; типы исполнительных органов; состав измерений с помощью ИБ и др.

На каждом этапе проектирования СПС производится ранжирование альтернативных вариантов по методике, приведенной в разд. 2.1. На рис. 91 приведены схемы выработки требований к СПС и подсистеме СУ СПС. Из анализа рис. 91 можно установить такую последовательность определения параметров ТО СПС.

1. Заполняется банк исходных данных по носителю (БД), СПС, группе маяков, единичному маяку, ограничениям, условиям функционирования системы (метеорологическим и т.п.). Проверяется наличие в банке информации табличных данных, рассчитанных с помощью моделей, приведенных в работах [ 1-9 ].
2. Рассчитываются точностные характеристики доставки СПС в район функционирования.
3. С помощью соотношения

$$\sigma_{\text{эт}} = \sqrt{\sigma_{\text{этх}} \sigma_{\text{этз}}}$$

рассчитывается эталонная среднеквадратическая ошибка доставки, где

$$\sigma_{\text{эти}} = \frac{R_i + i_m (1 - 1/m_i)}{3}, \text{ причем } i = x \vee z, \quad R_i - \text{размер зоны обзора ИБ СПС по осям, } i_m -$$

максимальная координата  $m$ -го маяка в группе по оси  $i (i = x \vee z)$ ,  $m$  число маяков по оси  $i$ .

4. С помощью номограмм или таблиц, рассчитанных при оптимизации подсистем СПС, определяется оптимальное значение радиуса зоны обзора датчика маяка СПС –  $R_{\text{опт}}$ .

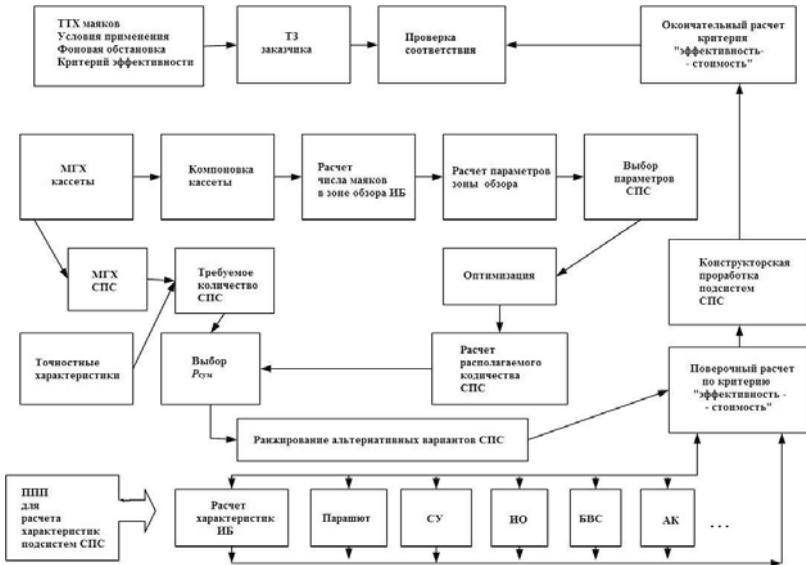


Рис. 91. Блок-схема исследования СПС

5. С помощью номограмм или таблиц рассчитывается оптимальное значение СКО рассеивания СПС в пространстве –  $\sigma_{opt}$ .
6. В случае применения понятия вкладов подсистем в общую эффективность рассчитываются вклады. В случае нормального закона рассеивания СПС упрощенные формулы расчета вкладов имеют вид:

а). при расположении датчика маяка на СПС

$$P_i = \left[ 2\Phi \left( \frac{i_m + R_i + \sigma_{pi} K(N_k)}{\sigma_i} \right) - 1 \right]^2;$$

б). при расположении дополнительного датчика маяка на блоке кассет

$$P_{li} = \left[ 2\Phi \left( \frac{i_m + R_{кас} + \sigma_{pi} K(N_k)}{\sigma_i} \right) - 1 \right]^2;$$

в). При наличии устройств коррекции блока кассет по радиокomандам

$$P_i = \left[ 2\Phi \left( \frac{i_m + R_i + \sigma_{pi} K(N_k)}{\sigma_{pki}} \right) - 1 \right]^2,$$

где  $K(N_k) = \text{arc}\Phi(1 - 1/N_k)$ ;  $i_m$  – координата  $m$ -го маяка по оси  $i$  ( $i = x \vee z$ );  $R_i$  –

размер зоны обзора датчика маяка по оси  $i$ ;  $\sigma_{pi}$  – СКО СПС по оси  $i$ ;  $\sigma_i, \sigma_{pi}$  – среднеквадратическая ошибка доставки СПС в район функционирования или радиокоррекции;  $\text{arcs } \Phi$  – функция, обратная интегралу вероятностей  $\Phi$ .

7. Рассчитывается расчетная величина вклада СПС:

$$\Delta N_5^p = N_{\text{кас}} P_i P_{1i}.$$

8. Рассчитывается потребное число СПС:

$$\Delta N_5^p = \Delta N_5^p (1 + \eta),$$

где  $\eta$  – заданный уровень потерь.

9. С использованием номограммы  $\Delta N_5^p = f(P_\Sigma, R)$  (специально рассчитывается по отдельной методике) рассчитывается значение суммарной вероятности СПС —  $P_\Sigma$ .

10. На основе расчетов для различных значений числа СПС и числа маяков составляется таблица вариантов технических решений, которая ранжируется по способу, изложенному в разделе 2.1. По результатам ранжирования выбираются наиболее рациональные технические решения СПС, которые могут быть рекомендованы для последующих этапов реализации, проектирования, испытаний и т.п.

В дальнейшем основной задачей перед потребителем будет разумное распределение имеющихся финансовых затрат и интегральных характеристик СПС.

## 5.6. Моделирование функционирования СПС

На основе материала разд. 3.5 (рис. 60) можно сформировать схему видов моделирования СПС (рис. 92).

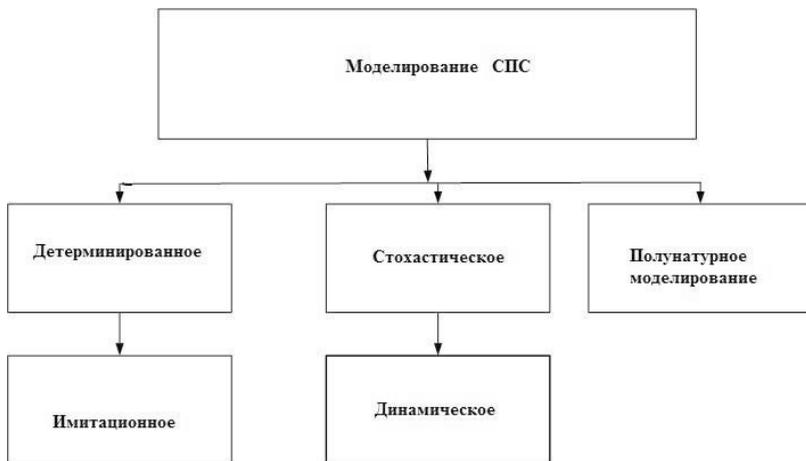


Рис. 92. Классификация видов моделирования СПС

На рис. 93 приведен перечень математических моделей описания динамики движения СПС, необходимых для реализации процесса моделирования.



Рис. 93. Перечень математических моделей

В работе [8] подробно рассмотрены все приведенные на рис. 93 математические модели для описания динамики движения СПС. Кроме того в той же работе приведены результаты полунатурного моделирования СПС.

На рис. 94-98 приведены основные результаты моделирования СПС.

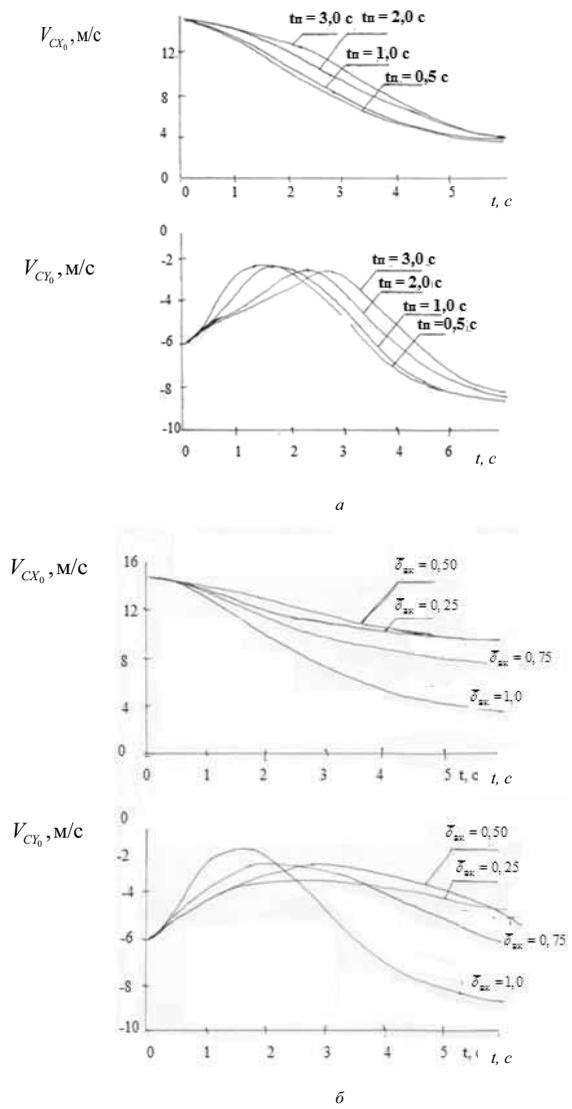


Рис. 94. Изменение составляющих скорости центра масс груза  $V_{CX_0}$ ,  $V_{CY_0}$  в процессе динамического торможения: а - конечное значение подтяга строп управления  $\bar{\delta}_{BK} = 1,00$ ; б - полное время подтягивания строп управления  $t_{PI} = 0,50$

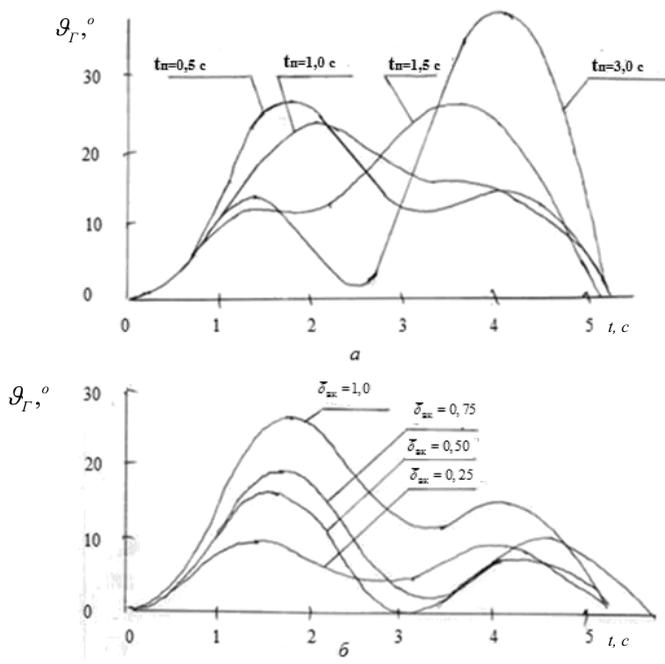


Рис. 95. Изменение угла тангажа груза  $\vartheta_r$  в процессе динамического торможения а - конечное значение подтяга строп управления  $\bar{\delta}_{\text{уп}} = 1,00$ ; б - полное время подтягивания строп упр

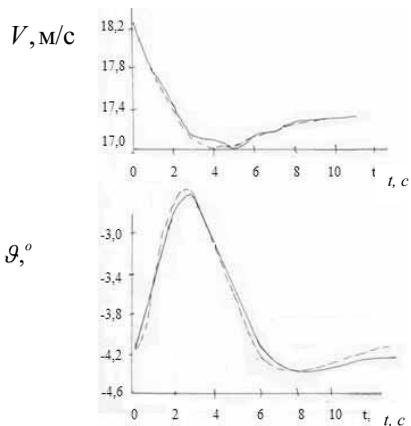


Рис. 96. Реакция на начальное возмущение по скорости  $V$

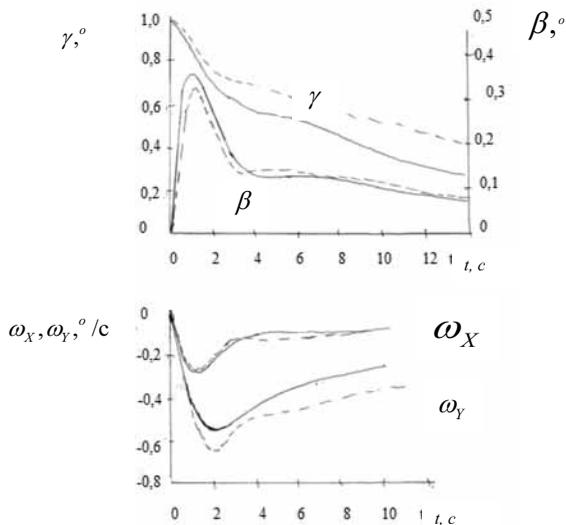


Рис. 97. Реакция на начальное возмущение по углу крена  $\gamma$  нелинейная модель динамики; ----- линейризованная модель,  $\bar{\delta}_B = 0$ ;  
 $\alpha, \beta$  – углы атаки и скольжения, соответственно;  $\omega_x, \omega_y$  – проекции вектора угловой скорости на оси координат

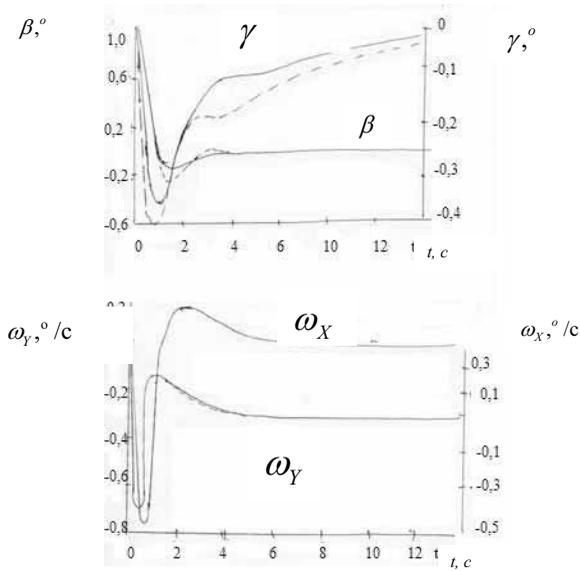


Рис. 98. Реакция на начальное возмущение по углу скольжения  $\beta$ ;  
 $\gamma$  – угол крена;  
 $\omega_x, \omega_y$  – проекции вектора угловой скорости на оси координат

### 5.7. Формирование технического облика СПС

Обобщая полученные результаты исследований СПС формируется технический облик системы. На рис. 99-102 представлена конструкция СПС в собранном и развернутом состоянии.

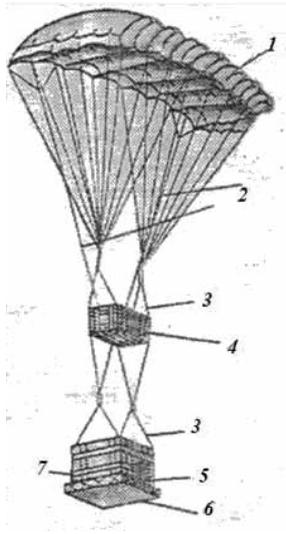


Рис. 99. Конструкция СПС:

1- парашют; 2 – стропы управления; 3 – подвесная система; 4 – блок управления;  
5 – командный блок СПС; 6 – платформа; 7 – блок обнаружения

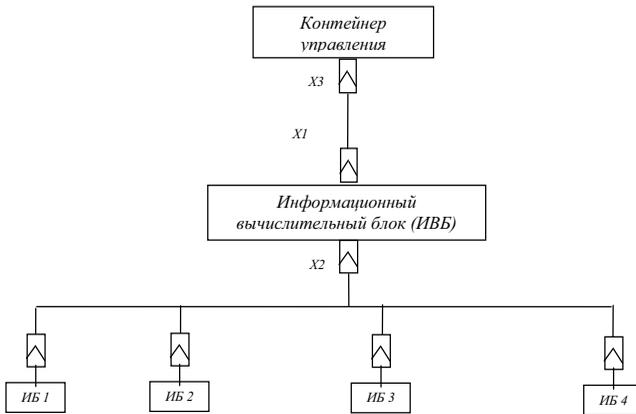


Рис. 100. Схема подводки жгутов

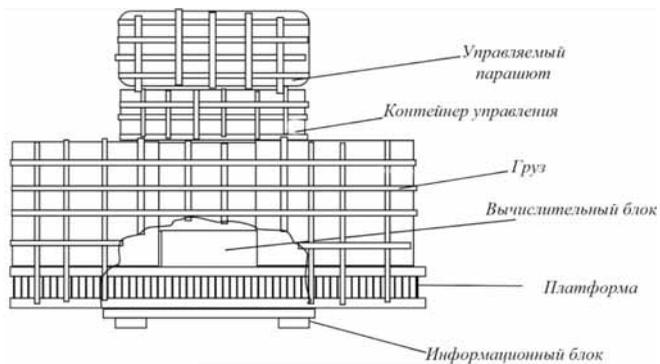


Рис. 101. Платформа в собранном виде, перед погрузкой в носитель

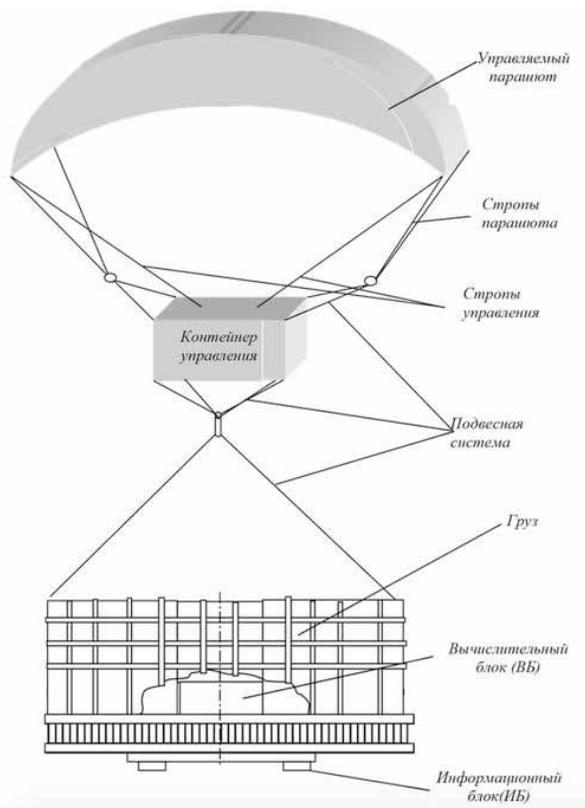


Рис. 102. Платформа в развернутом состоянии

## 5.8. Оптимизация параметров СПС

В разд. 2.7 в качестве примера использования метода Хука-Дживса была проведена оптимизация параметров ИБ СПС с ИК датчиком (рис. 29-31). Можно еще привести пример оптимизации параметров СПС, причем результаты оптимизации оформлены в виде номограммы от основных вероятностных величин (рис. 32).

## 5.9 Этапы оценки СПС

Исходя из материалов разд. 3.9 запишем этапы оценки СПС

- этап определения цели оценивания включает в себя определение характеристик:
  - качественных;
  - количественных – МГХ, вероятностных, точностных;
- этап измерения существенных свойств СПС включает математическое моделирование, полунатурное моделирование и летные испытания;
- критерии качества включают в себя критерий эффективности  $P_{\Sigma}$ ;
- этап собственно оценивания включает в себя ранжирование матрицы альтернативных вариантов, полученных в результате оптимизации подсистем СУ и ИБ.

Таблица 37. Матрица альтернативных вариантов СПС

№ варианта	Структура СПС	Характеристики		
		$P_{\text{поп}}$	$P_{\text{обн}}$	$P_{\text{лс}}$
1	СУ с ИК ГСН	0,8	0,7	0,1
2	СУ с АК	0,7	0,7	0,1
3	СУ с ИК + АК	0,95	0,85	0,01
4	Неуправляемая	0,4	0,0	0,0

В табл. 37 приведены несколько вариантов структуры СПС. С помощью спектрального метода ранжирования альтернативных вариантов (разд. 2.1) проводятся расчеты, результаты которых приведены на рис. 103-104.

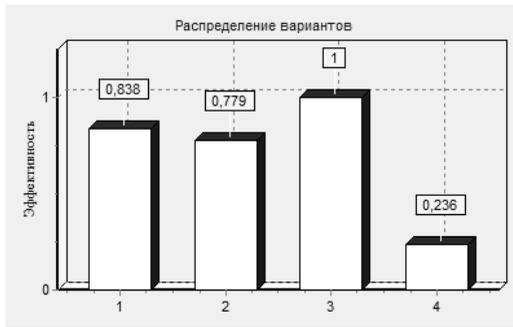


Рис. 103. Результаты ранжирования вариантов СПС

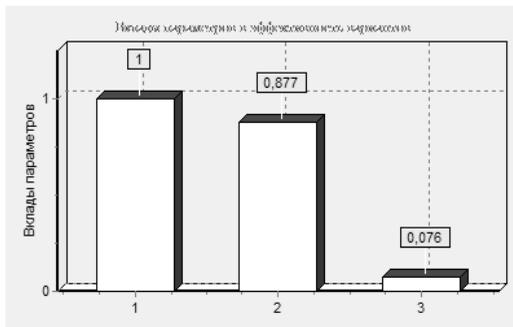


Рис. 104. Величины вкладов характеристик в общую эффективность

Из анализа рис. 103 следует, что наилучшим вариантом является структура СПС с комбинированным датчиком. Более точное решение можно получить, если добавить такие показатели как стоимость СПС, стоимость груза, точность доставки и т.п. Из анализа рис.104 следует, что наиболее важный вклад вносит вероятность попадания СПС в маяк. Оба результата соответствуют качественному анализу ТО и схеме функционирования СПС.

\*\*\*

В главе рассмотрена процедура проектирования сложной системы на примере СПС. Более подробная информация о проектировании СПС приведена в работах [ 7,8 ] .

## Глава 6. ПРИМЕР ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОДСИСТЕМЫ СПС— АКУСТИЧЕСКИЙ КАНАЛ

### 6.1. Общее представление акустического канала как подсистемы СПС

**Пассивный акустический канал (АК)** для записи, обработки и анализа звуковых сигналов различной природы, предназначен как для идентификации нахождения звукового источника, так и для применения в точных системах наведения в качестве вспомогательного канала для повышения точности и помехоустойчивости системы.

Принцип действия: АК принимает звуковое излучение шумящего объекта (звукового маяка). Записанные звуковые сигналы преобразуются, конвертируются и обрабатываются в бортовой вычислительной машине для получения корреляционной функции (КФ) по двум взаимно-перпендикулярным плоскостям. По полученным КФ рассчитываются углы ориентации маяка в системе координат, связанной с АК.

Входом АК являются акустические (звуковые) сигналы в диапазоне 2,5...6 кГц. Выходом АК являются величины пространственных углов ориентации линии визирования звукового маяка.

#### **Технические характеристики одного из вариантов АК:**

- акустическая база – 600 мм; число микрофонов по два в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, дальность действия – 1,2 ... 1,5 км;
- АЦП: число разрядов в регистре - 12; максимальная частота выборки – 500 кГц;
- микрофон А2: чувствительность в режиме холостого хода – 5...12 мВ/Па; выходное сопротивление микрофона не более – 3,5 кОм;
- маяк: система «Смерч» — рабочий диапазон до 6 кГц; среднее звуковое давление – 122 дБ;
- технико-экономический эффект – повышение точности определения местоположения звукового маяка в 2,5—3 раза.

Отечественных аналогов – нет; зарубежный аналог – акустическая система на точном кассетном элементе «Bat», отличающаяся принципами и схемой реализации [7]. В общем виде схема функционирования АК представлена на рис. 105.

В последние годы в зарубежных и отечественных перспективных разработках

аппаратуры управления летательными аппаратами (снарядах, беспилотных летательных аппаратах, системах доставки грузов населению и др.) большое внимание уделяется акустическим методам обнаружения и пеленгации наземных объектов техники с использованием приемников звука — микрофонов или акустических систем на их основе [37 – 39].

Интерес к использованию акустических методов обусловлен, главным образом, успехами в освоении интегральной элементной базы, методов обработки сигналов с применением ЭВМ.

В последнее время интерес к акустическим датчикам растет не только в связи с их тактико-техническими достоинствами, но и вследствие относительной дешевизны их производства и эксплуатации по сравнению с другими датчиками.

Для обнаружения и пеленгации акустического поля наземных объектов с работающим двигателем (находящимся в движении или на стоянке) обычно используется акустические пеленгаторы фазометрического типа, требующие использования одной или двух пар акустических датчиков (для пеленгации в двух плоскостях), разнесенных на базовое расстояние, обеспечивающее заданную точность пеленгации; при этом для обеспечения требуемой базы компоновка акустических датчиков должна производиться на элементах конструкции в плоскости, ортогональной продольной оси летательного аппарата. Такими элементами, например, в управляемом снаряде являются крылья и стабилизаторы, имеющие небольшую толщину (единицы мм).

Размещение малогабаритных электронных микрофонов типа МКЭ-3 или других на консолях стабилизаторов и крыльях летательного аппарата без нарушения аэродинамических характеристик практически невозможно.

Исторически воздушная акустика применялась в годы Второй мировой войны для локации самолетов. Затем из-за отсутствия элементной базы, имеющей достаточно высокие характеристики, это направление не получило развития в технике. Следует иметь в виду, что подобные системы могут быть в большинстве случаев только пассивными, так как создание звукового сигнала высокого уровня (более 200 дБ и выше) отрицательно повлияло бы на здоровье людей. Активные системы могут быть применены в особых, чрезвычайных случаях: например, для доставки грузов полярникам на льдине, где в качестве маяка могут выступать ревуны или звуковые маяки.

С появлением в последнее время микрофонов и пленочной технологии, имеющих достаточно высокие характеристики, появилась возможность создания АК для применения в системах доставки грузов в труднодоступные районы, в автомобильной промышленности, в морском флоте.

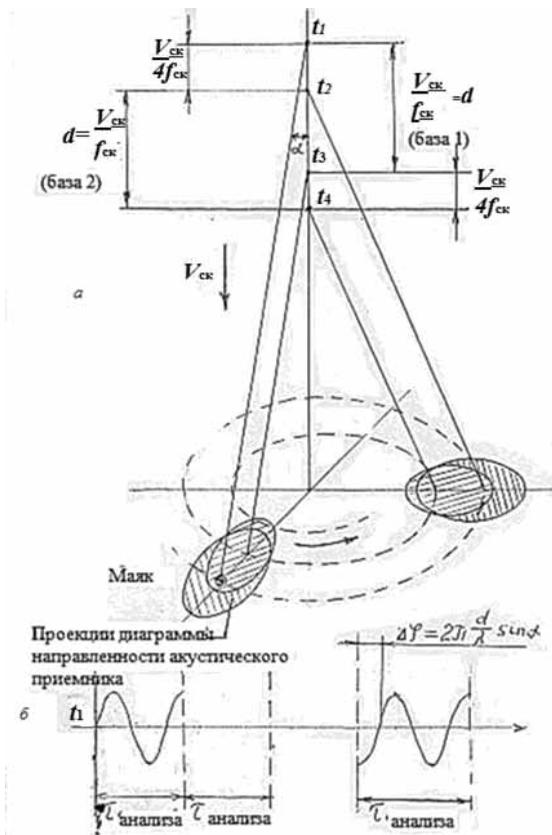


Рис. 105. Схема работы акустического пеленгатора:  
*а* - схема сканирования местности акустическим пеленгатором;  
*б* - реализации акустического сигнала, принятые на выходе микрофона

## 6.2. Формирование перечня системных связей акустического канала

Исходя из перечня возможных системных связей СТС формируется соответствующий перечень системных связей для АК СПС, приведенный на рис. 106.

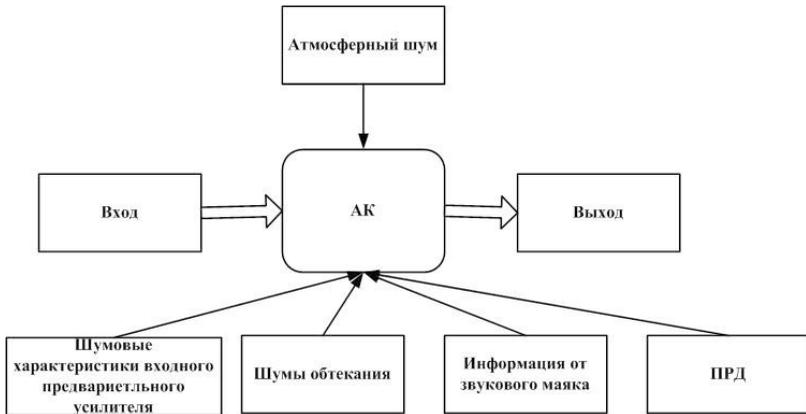


Рис. 106. Перечень системных связей АК СПС

### 6.3. Декомпозиция акустического канала

В качестве примера рассматривается координатор, имеющий следующие основные параметры [39]:

- угловое пеленгуемое поле  $+15^{\circ}$ ;
- точность определения координат не хуже  $2^{\circ}$ ;
- частота выдачи координат 30 Гц (такт 0,03 с).

Для определения параметров вычислителя максимума корреляционной функции и, соответственно, координат звукового источника предположим, что случайный нормальный шумовой процесс на выходе микрофона имеет корреляционную функцию вида

$$K(\tau) = \exp(-\beta |\tau|).$$

Физически вычисление координат осуществляется следующим образом. Задается тактовая частота, равная времени интегрирования (рис. 105). С началом такта реализации случайного процесса с двух первых микрофонов и параллельно с двух вторых микрофонов выдаются на вычислители корреляционные функции. Если угол  $\alpha = 0$  (линия визирования перпендикулярна линии расположения микрофонов), то максимум корреляционной функции располагается в начале такта. Соответственно, как отмечалось ранее, при  $\alpha \neq 0$  максимум сдвигается от начала такта на время:  $d \sin \alpha / V_{зв}$ .

Для обеспечения фиксации отклонения линии визирования как в одну, так и в

другую сторону от перпендикуляра, в вычислитель необходимо ввести задержку

$\Delta\tau_{\max} / 2 = d \sin\alpha_{\max} / 2V_{\text{зв}}$ , где  $\alpha_{\max}$  - максимальные значения угла отклонения линии визирования.

Соответственно нулевое положение линии визирования (линия визирования перпендикулярна плоскости расположения микрофонов) отсчитывается тогда, когда задержка максимума корреляционной функции  $\Delta\tau = \Delta\tau_{\max} / 2$ .

Электронная схема АК СТС представляет собой набор плат и микросхем, реализующих различные функции акустического пеленгатора. Для осуществления записи и последующей спектральной корреляционной обработки сигналов была разработана схема усилителя каналов, работающая либо от пьезопреобразователя из полимерной пленки, либо от штатного электронного микрофона.

К такому усилителю предъявляются высокие требования по идентичности сквозных амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик. Идентичность достигается путем подбора микрофонов и элементов усилителей. Амплитудно-частотная характеристика одного канала показана на рис. 107.

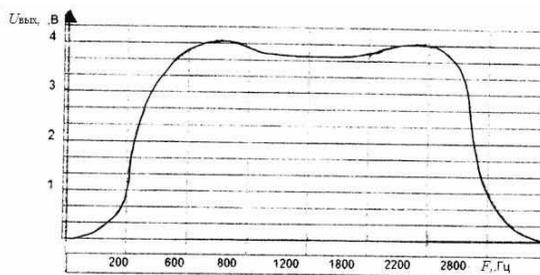


Рис. 107. Амплитудно-частотная характеристика одного канала

На рис. 108 приведена функциональная схема акустического координатора. Из рассмотрения рисунка следует, что технический облик АК можно представить как набор следующих блоков: акустические датчики; блоки памяти; блоки преобразования аналого-цифра; блоки полосовых фильтров; блоки корреляционной обработки сигналов; блок выработки команд, передаваемых в систему управления.

Акустический координатор работает следующим образом. Акустические датчики 1-2 преобразуют звуковое давление поля в электрический сигнал, который

оцифровывается аналого-цифровым преобразователем и запоминается в блоке памяти. Эти сигналы периодически считываются из блоков памяти для вычисления взаимокорреляционной функции датчиков 1-2 . Таким образом, декомпозиция АК представляет собой сочетание 4-х каналов, включающих блоки измерения, обработки и вычисления выходной величины.

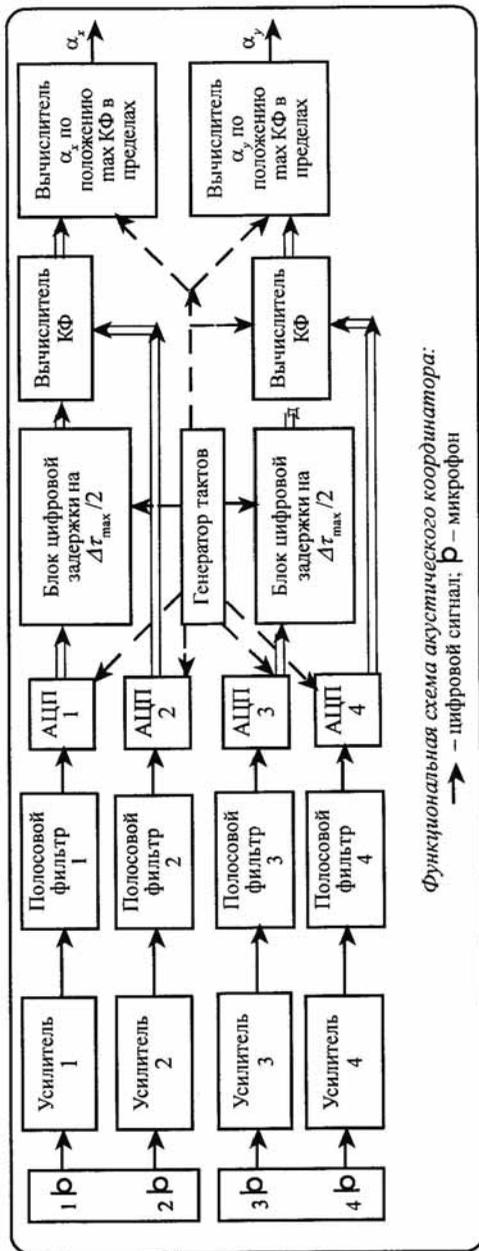


Рис. 108. Блок-схема акустического канала  
АЦП – аналого-цифровой преобразователь; КФ – корреляционная функция;

#### 6.4. Определение частных и обобщенных критериев эффективности акустического канала

В общем случае обобщенный показатель эффективности АК в составе СПС  $P_{\Pi}$  определяется зависимостью

$$P_{\Pi} = P_{\text{пз}} (1 - P_{\text{лс}}) P_{\text{по}} (1 - P_{\text{с}}) P_{\text{н}},$$

где

$P_{\text{пз}}$  – вероятность правильного обнаружения маяка;

$P_{\text{лс}}$  – вероятность ложного срабатывания;

$P_{\text{с}}$  – вероятность слежения;

$P_{\text{н}}$  – вероятность наведения.

Вероятность наведения вычисляется по формуле

$$P_{\text{н}} = \iint_{S_m} F_{\text{н}}(x, z) f(x, z) dx dz = \\ = \iint_{S_m} \left[ \frac{1}{2\pi\sigma_{\text{сyx}}\sigma_{\text{сyz}}} \exp\left(-\frac{(x - M_{\text{сyx}})^2}{2\sigma_{\text{сyx}}^2} - \frac{(z - M_{\text{сyz}})^2}{2\sigma_{\text{сyz}}^2}\right) f_{\text{н}}(x, z) \right] dx dz$$

После определения закона распределения точек индикации  $f_{\text{н}}$  выражение для  $P_{\text{н}}$  можно записать в виде

$$P_{\text{н}} = \int_{-3\sigma_x}^{3\sigma_x} \Phi\left(\frac{\xi - x}{\sigma_{\text{сyx}}}\right) f_{\text{н}}(x) dx \int_{-3\sigma_z}^{3\sigma_z} \Phi\left(\frac{\xi - z}{\sigma_{\text{сyz}}}\right) f_{\text{н}}(z) dz,$$

или, получив имитационным моделированием размеры области индикации  $\Delta x_i, \Delta z_i$ ,

$$P_{\text{н}} = \left[ 2\Phi\left(\frac{\Delta x_i}{\sigma_{\text{сyx}}}\right) - 1 \right] \left[ 2\Phi\left(\frac{\Delta z_i}{\sigma_{\text{сyz}}}\right) - 1 \right].$$

Основным параметром акустических систем является предельная дальность обнаружения (ПДО) маяка. Подробнее характеристики ПДО рассмотрены в следующем разделе. В качестве основного показателя используется угол линии визирования маяка  $\psi$

Угол визирования объекта  $\psi$  находится из условия максимума корреляционной функции  $R_{\text{хх}}(\tau)$ :

$$\psi = \arcsin\left(-\frac{\tau V_3}{d} \frac{\left[1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2\right]}{\left[1 + \frac{ab}{h^2}\right]} \sqrt{1 + \left(\frac{b}{h}\right)^2}\right).$$

Здесь  $\tau$  – переменная интегрирования,  $V_3$  – скорость звука,  $d$  – расстояние между микрофонами;  $a$ - расстояние 1-го микрофона от оси СТС;  $b$ - расстояние второго микрофона от оси СПС;  $h$ - расстояние от центра канала до маяка;  $\psi$  – угол визирования маяка.

Для нашего случая  $a \ll h$  и  $b \ll h$ , поэтому после преобразований получим упрощенную формулу для расчета угла линии визирования объекта, при этом полагаем  $\tau = n \Delta t$ . Здесь  $n$  – номер отсчета;  $\Delta t$ - интервал дискретизации периода звуковых колебаний.

## 6.5. Методика проектирования акустического канала

В настоящее время звуковой (акустический) канал для воздушных объектов в РФ отсутствует и его разработка представляет решение новой научно-технической задачи применительно к ИБ СТС, основной функцией которых является осмотр поверхности земли, экологический мониторинг, доставка грузов в труднодоступные районы земли, решение задач наведения и управления в заданный район (или заданную точку).

Приведем основные соотношения для расчета ПДО. При выводе уравнения оценки дальности обнаружения объекта приняты следующие допущения:

- источник звука точечный;
- звуковые давления создаваемые каждым маяком протяженного объекта независимы друг от друга;
- расстояния между маяками могут быть сравнимы с дистанцией обнаружения и при суммировании давлений необходимо учитывать диаграмму направленности микрофона.

Запишем решение волнового уравнения для звукового давления  $P$  в виде

$$P(R) = P_0 / R \exp\{-(\delta_c + \delta_m)R\},$$

где  $\delta_c$  - коэффициент вязкого затухания звука;

$\delta_m$  - коэффициент молекулярного затухания звука;

$R$  – расстояние;

$P_0$  - константа, определяемая из начальных условий или эксперимента для рассматриваемого источника звука.

Линеаризуя и удерживая первый член разложения в ряд, получим уравнение предельной дальности

$$P_o/R (1 - \delta R) - P_\phi = u_{ш} K_{C/Ш} / S_{\text{микро}},$$

где  $P_\phi$  - звуковое давление, создаваемое фоном (Па);

$u_{ш}$  - напряжение шума (В);

$K_{C/Ш}$  - отношение сигнал/шум (например, такое как при обнаружении сигнала на фоне белого шума с заданной вероятностью);

$S_{\text{микро}}$  - коэффициент преобразования микрофона (В/Па).

Звуковое давление, создаваемое группой маяков относительно уровня звукового давления, полученного при экспериментальных исследованиях, моделируется в виде

$$P_{ак} = \sqrt{\sum_{i=1}^n P_o^2 / R_i^2 [D^2(\theta, \varphi) \cos^2 \theta_i \exp(-\delta R)]},$$

где  $D(\theta, \varphi)$  - диаграмма направленности микрофона в зависимости от азимута и угла места;  $R_i$  - расстояние до маяка в группе;  $n$  - число маяков в группе;  $R_{\text{эксп}}$  - дистанция, с которой производились экспериментальные измерения;  $R$  - наклонная дальность от  $i$ -го маяка до микрофона. Далее можно любым численным методом определить расстояния  $R$  при разных  $K_{C/Ш}$ .

**Результаты математического моделирования.** Результаты расчетов пороговых дальностей в зависимости от отношения сигнал-шум (С/Ш) приведены в табл. 38. При расчете принималось, что линия визирования направлена в центр группового маяка и групповой маяк визируется вертикально.

Таблица 38. Расчет дальностей

Параметры	Вариант 1				Вариант 2			
Движущиеся пассивные маяки (например, расположенные на льдине, катере)								
$R$ , м	460	280	200		1140	880	540	
Неподвижные активные маяки (динамики, сирены, ревуны)								
$R$ , м	840	580	440	240	2000	1560	1000	
$K_{C/Ш}$	1	3	5	10	1	3	5	10

Расчет по варианту 1 проводился при  $P_{об}=60$  дБ,  $P_\phi=30$  дБ,  $f=3$  кГц; по варианту 2 - при  $P_{об}=70$  дБ,  $P_\phi=30$  дБ,  $f=3$  кГц ( $P_{об}$ ,  $P_\phi$  - пороговые величины обнаружения маяка и фона соответственно).

Из анализа табл. 38 следует, что поглощение звука в атмосфере уменьшает значение пороговых дальностей примерно на 10%. Если допустить, что измерение фазы производится с точностью не менее 10...20% , то пороговые дальности лежат в диапазоне 200...1560 м, в зависимости от типа группы маяков и звукового давления создаваемого ими в точке приема. Чем лучше чувствительность микрофона (коэффициент преобразования), тем больше дальность.

**Расчет угловой скорости визирования** и углы пеленга в связанной системе координат. В данном пункте рассматриваются соотношения для расчета угловой скорости визирования и угла пеленга в связанной системе координат СТС с учетом данных от акустического канала. Положение линии визирования определяется двумя парами микрофонов с взаимно перпендикулярными базами  $d_1$  и  $d_2$ . Таким образом, для определения угловой координаты линии визирования необходимо измерить временную задержку максимума КФ относительно начала отсчета.

При использовании комплексной информационной системы, включающей совместную работу акустического и точного координаторов пересчет углов пеленга для реальных траекторий наведения неэффективен, так как координаты акустического объекта (т.е. данные с АК) мало отличаются от исходных. Чтобы избежать сложного пересчета координат маяка, полученных с АК и точного канала, предлагается, начиная с определенного участка траектории, подавать в автопилот (или его аналог) дополнительную команду управления для доворота продольной оси изделия в сторону маяка. Один из вариантов подачи команд с акустического датчика следующий

$$\delta_1^c = k \sin \psi_A(t);$$

$$\delta_2^c = k \cos \psi_A(t),$$

где  $\delta_1^c, \delta_2^c$  - команды управления смещением по тангажу и курсу соответственно,

$\psi_A(t)$ - полярный угол маяка по данным с АК,

$k$  - коэффициент команды, обеспечивающий заданную угловую скорость СТС.

Для устойчивости смещения команда формируется тогда, когда разность фаз акустического и оптического объекта по модулю более  $90^\circ$  :

$$\delta_1^c = k \sin \psi_A(t), \quad \text{при } |\psi_A - \psi_O| > \pi/2;$$

$$\delta_2^c = k \cos \psi_A(t);$$

$$\delta_1^c = 0, \quad \text{при } |\psi_A - \psi_O| < \pi/2.$$

$$\delta_2^c = 0.$$

Анализ результатов моделирования при различных среднеквадратических отклонениях шумов измерения АК показал, что к точности измерения фазы маяка не предъявляются жесткие требования. Удовлетворительное качество наведения

обеспечивается при точности измерения фазы по СКО  $10^\circ \dots 30^\circ$ . При малых значениях угловых рассогласований необходимо вводить дополнительное условие, связанное с пороговым значением рассогласования. В случае использования системы для наземных мобильных изделий в приведенных соотношениях используются только соотношения для курса аппарата.

**Выбор и обоснование спектрального диапазона АК.** Выбор и обоснование спектрального диапазона АК проводится на основе результатов полигонных испытаний акустических датчиков. К сожалению, описать математической моделью решение этой задачи не удается.

В качестве исходных объектов для акустической системы была выбрана автомобильная и тракторная техника, находящаяся в движении и на стоянке. Скорость варьировалась до 50 км/ч. Основной задачей полигонных испытаний являлось определение предельной дальности действия акустической системы для различных условий функционирования. Предельная дальность обнаружения определялась как расстояние, на котором уровень полезного сигнала сравнивался с уровнем естественного (или электрического) шума. Излучение принималось микрофонами акустической антенной системы, также аппаратурой фирмы RFT. Для регистрации акустических сигнатур использовался измерительный микрофон Н067. Сигналы с выходов микрофонов RFT усиливались и фильтровались в различных октавных полосах шумомерами 00 023. Напряжение с выхода шумомеров подавалось на магнитограф Н067, а также вводилось в ЭВМ. При обработке с помощью самописца строились зависимости уровней акустических сигналов от времени (рис. 109).

Анализ спектральных характеристик полученных цифровых реализаций подтвердил, что искажения спектра, вносимые преобразованием, пренебрежимо малы.

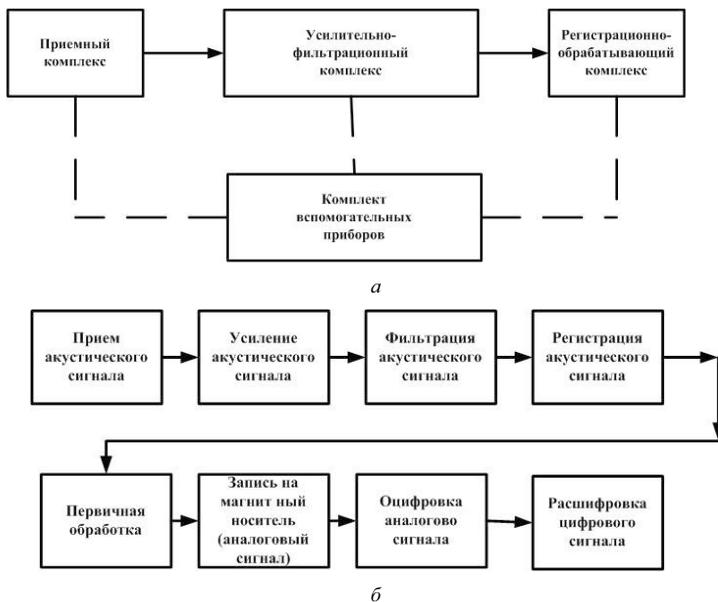


Рис. 109. Блок-схема регистрирующего комплекса: *а* – состав; *б* – последовательность действий

Диапазон изменения амплитуды сигнала на входе АЦП ограничен значениями  $(-5.12...+5.12)$  В. Этот интервал АЦП разбивает на 2048 уровней и присваивает каждому уровню порядковый номер  $(-5.12$ В это 0,  $+5.12$ В это 2048) Этот номер представлен в двенадцати младших разрядах двухбайтного слова, старшие 4 разряда несут служебную информацию для программы регистрации. Таким образом, каждый отсчет представляет собой двухбайтное слово (16 разрядов).

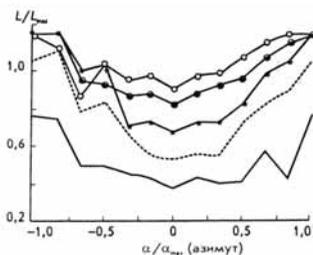


Рис. 110. Диаграмма направленности акустического излучения автомобиля в азимутальной плоскости:

$\alpha/\alpha_{\max}$  – относительный азимут маяка;  
 $L/L_{\max}$  – относительный уровень акустического сигнала;  
 $f/f_{\max}$  – относительная частота акустического излучения;  $i \times f/f_{\max}$ , где  $i = 1, \dots, 16$ ; —○— — 0,06; —●— — 0,13;  
 — — — — — 0,25; - - - - - 0,50; — — — — — 1,00.

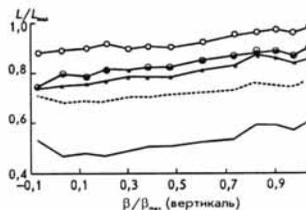


Рис. 111. Вертикальная диаграмма направленности акустического излучения:

$\beta/\beta_{\max}$  – относительный угол в вертикальной плоскости;  $L/L_{\max}$  – относительный уровень акустического сигнала;  $f/f_{\max}$  – относительная частота акустического излучения;  $i \times f/f_{\max}$ , где  $i = 1, \dots, 16$ ; —○— — 0,06; —●— — 0,13;  
 — — — — — 0,25; - - - - - 0,50; — — — — — 1,00.

Из анализа экспериментальных данных следует

- — в целом шумовая обстановка позволяла уверенно выделять сигналы как от движущихся объектов, так и от машин в режиме стоянки при работе двигателей в режиме холостых оборотов;
- — отмечена аномальная зависимость уровня акустического сигнала от расстояния ( в некоторых случаях уровень растет при увеличении дистанции);
- — на высоких частотах объекты исследования имели ярко выраженную диаграмму направленности в угломестной плоскости;
- — помимо расстояния на уровень акустического сигнала влияют: скорость движения объекта и диаграмма направленности;
- — при увеличении скорости объекта растет уровень акустического сигнала;
- — диаграмма направленности зависит от сложности пространственного распределения поля, определяемого тем, что объекты имеют несколько источников высокочастотного звука, распределенного в пространстве, и размеры объекта много больше длины акустической волны;
- — отмечено, что три объекта, отличавшиеся по мощности двигателя, имеют сравнимые уровни высокочастотной акустики;
- — при приеме звука микрофоном, расположенным в верхней полусфере, влиянием подстилающей поверхности можно пренебречь.

На рис. 110-111 приведены некоторые результаты расшифровки полигонной информации, из которых видно, что чем ниже частота звукового сигнала, тем более устойчивые результаты по ПДО. Для выбора частотного диапазона необходимо в каждом конкретном случае анализировать условия функционирования предполагаемой СТС и проводить выбор параметров акустической системы исходя из полученных результатов на полигоне.

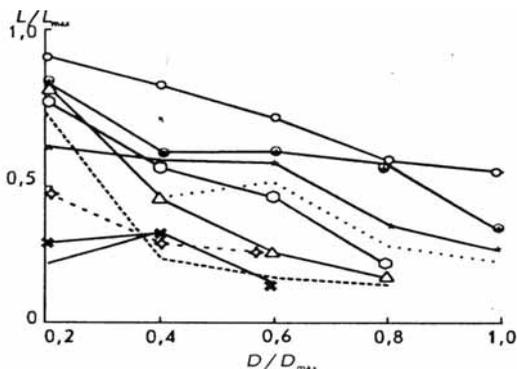


Рис. 112. Зависимость уровней сигнала в терцоктавных полосах от расстояния:

$D/D_{max}$  – относительное расстояние;  $L/L_{max}$  – относительный уровень акустического сигнала;  $f/f_{max}$  – относительная частота акустического излучения;  
 $i \times f/f_{max}$ , где  $i = 1, \dots, 16$ ; —○— — 0,06; —●— — 0,13; ..... — 0,20;  
—×— — 0,25; —○— — 0,30; —△— — 0,40; - - - - - — 0,50; ····◇···· —  
0,63; —\*— — 0,80; — — — — — 1,00.

Из рассмотрения рис.110 следует, что с увеличением азимута при любой частоте уровень сигнала от акустического объекта возрастает. На рис. 111 видны незначительные изменения уровня сигнала в вертикальной плоскости. Анализ рис.112 показывает ослабление уровня акустического сигнала объекта с ростом расстояния. Лучшие результаты сигнала объекта имеют место при  $f/f_{max} = 0,0625 \dots 0,1250$ .

Таким образом, из анализа рис. 110 - 112 следует, что наиболее приемлемой относительной частотой акустического канала является частота  $f/f_{max} = 0,06 \dots 0,13$ .

В итоге можно сделать несколько выводов.

1. Результаты полигонных испытаний акустической системы показывают, что воздушная акустика может быть использована для реализации акустического канала СТС для решения задач наведения на звуковой маяк. Это может быть доставка грузов в труднодоступные районы, в автомобильной промышленности, в морфлоте. В качестве

звуковых маяков могут быть использованы сирены, ревуны, тракторный двигатель.

2. Возможно применение акустической системы в СТС с комбинированным блоком обнаружения в качестве вспомогательного канала для повышения надежности функционирования системы.

3. Анализ полигонных испытаний акустической системы показал, что предельная дальность существенно зависит от вида маяков, условий применения, выбранного частотного диапазона, параметров микрофонов и может достигать в пределе 2...3 км.

### **6.6. Формирование технического облика акустического канала**

На основе полученных результатов исследования АК был сформирован ТО АК. На рис. 113 приведено основание для размещения 4-х датчиков АК СПС. На рис. 114 приведен АК в сборке, на рис. 115 – размещение 4-х каналов в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях.

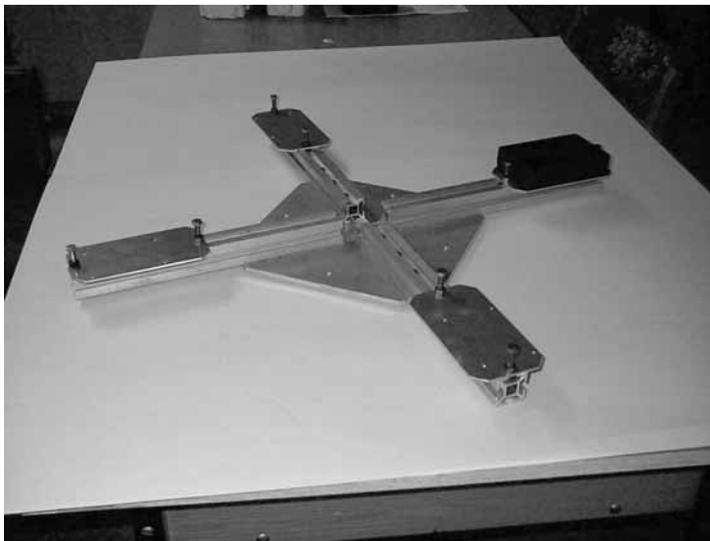


Рис.113. Основание для размещения 4-х датчиков АК СПС

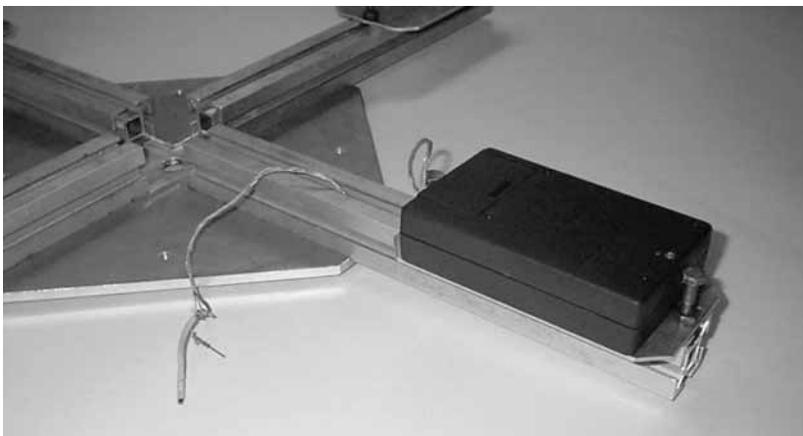


Рис. 114. Акустический датчик в сборке АК СПС



Рис. 115. Размещение 4-х датчиков АК СПС в 2-х взаимно перпендикулярных плоскостях

Приведенный на рис. 115 облик АК СПС построен на основе блок-схемы, приведенной на рис. 108. Информация с АК СПС поступает в БВС для обработки и расчета корреляционной функции измеренных акустических сигналов.

### **6.7. Этапы оценки акустического канала**

Оценка АК СПС проводилась с помощью моделирования – лабораторного, стендового и полигонного.

Для отработки принципов построения акустического канала СТС был разработан макет АК, причем в качестве приемной части использовались микрофоны типа МК. На рис. 116 приведена структурная схема отработки АК для самонаводящейся платформы, предназначенной для доставки грузов в труднодоступные районы земли.

Далее приводятся результаты отработки макета АК СТС в лабораторных условиях, на местности и в акустической трубе. В качестве источников сигналов использовались как стандартные сигналы с генератора, так и записанные на полигоне реальные акустические сигналы одиночных и групповых объектов типа автомобильной и тракторной техники.

#### **Лабораторные испытания**

С помощью генератора сигналов специальной формы Г6-28 подается сигнал частотой 3,5 кГц ( $V=1В$ ); на расстоянии  $d = 4,2$  м находится приемная часть АК СТС, соединенная с АЦП ПЭВМ №2. Контроль правильности подачи сигнала с генератора осуществляется с помощью осциллографа С1- 68, сигнал с микрофонов контролируется 2- лучевым осциллографом С1-103.

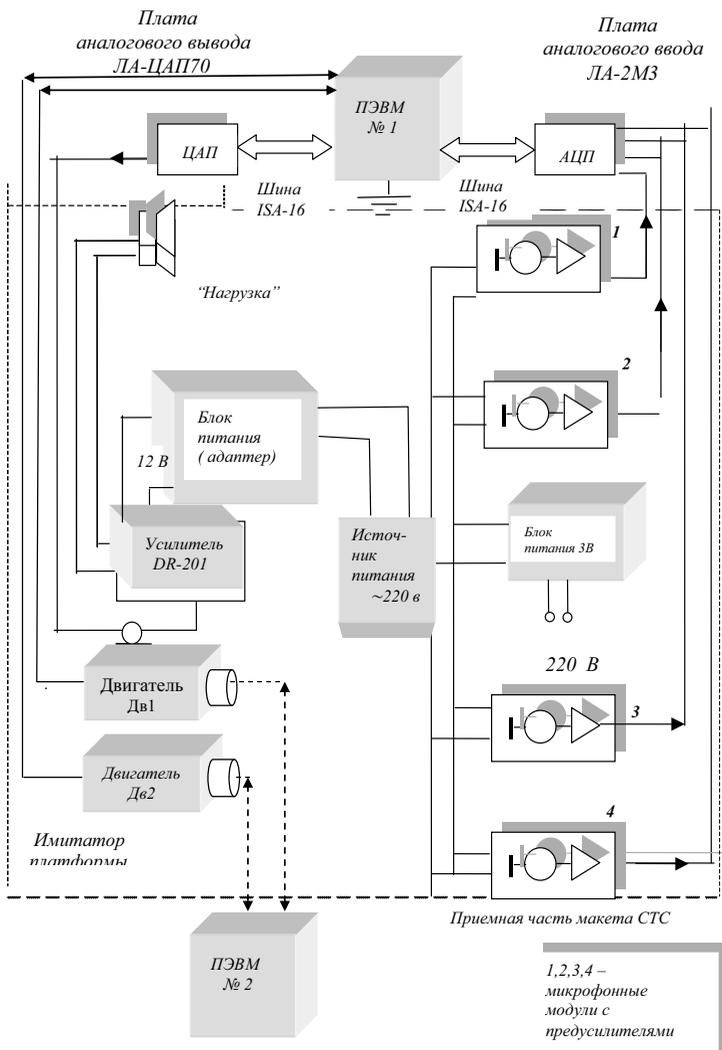


Рис. 116. Блок-схема экспериментальных исследований макета СТС

С помощью поворотного устройства приемная часть АК СТС поворачивается вправо и влево, причем углы поворота фиксируются по шкале в диапазоне  $\pm 20^\circ$ .

Выставка оси "ось приемной части АК - рупор" осуществляется с помощью лазерной линейки, причем рупор находился на линии, совпадающей с осью приемной частью. Сигналы с микрофонов приемной части лабораторного макета АК СТС записываются в память ПЭВМ с помощью математического обеспечения АЦП, позволяющего осуществлять запись либо с электронного осциллографа, либо с помощью программы la2 dSK.exe. С помощью электронного осциллографа осуществляется запись либо с одного либо одновременно с 2-х каналов (микрофонов); с помощью программы la2 dSK.exe можно записывать информацию с любого количества каналов (1 – 4 микрофона). С помощью шумомера измеряется интенсивность звукового давления на уровне высоты измерений.

### **Испытания АК СТС на местности**

При проведении испытаний на местности в качестве источника звука используются акустические сигналы объектов, записанные на полигоне; сигналы, вырабатываемые генератором сигналов специальной формы, и формируемые тестовой программой dma\_dac, входящей в состав программного обеспечения АЦП.

Сигналы на рупоры передающей части лабораторного макета АК подаются с помощью ЦАП. ЦАП, установленная на ПЭВМ №1, преобразует полигонные данные, которые были записаны на полигоне и расшифрованы предварительно.

Эксперимент с лабораторным макетом проводится на местности (рис. 117):

- передающая часть макета располагается на расстоянии - два осциллографа, ПЭВМ №1, усилители, адаптер;
- приемная часть АК располагается на заданной высоте (например, на верхнем этаже здания) ;
- регистрирующая и контролирующая аппаратура располагается там же: осциллограф и шумомер, ПЭВМ №2;
- обработка записей акустических сигналов проводится на ПЭВМ №3, расположенной в пункте обработки информации.

На первом этапе испытаний записывается уровень фонов в различное время и при различных условиях. Затем формируется гармонический сигнал частотой 3,5 кГц с помощью одного, двух и четырех рупоров. Полигонные данные передаются для проверки работоспособности канала в реальных условиях.

В нашем примере, уровень фона составил  $80 \pm 2$  дБ, что достаточно высоко по сравнению с безэховой акустической камерой (48 дБ). Это вызвано тем обстоятельством,

что шум города на уровне верхнего этажа достаточно высок, так как отсутствует его поглощение и ослабление земной поверхностью (рис. 118 – 128).

Это косвенно подтверждает вывод, что акустическая информация вдоль оси OZ (вертикаль) более информативна нежели вдоль осей OX, OY.

Сигналы с рупора имели превышение в 10...16 дБ, что позволяло получить на осциллограммах полезного сигнала отношение сигнал/ шум = 2...3.

Этого значения достаточно для выделения полезного сигнала, который затем преобразуется в виде углов курса и тангажа и ввода корректирующих сигналов в систему управления СТС.

Сигналы с рупоров принимались микрофонами приемной части лабораторного макета АК устойчиво и четко. При появлении сильного бокового ветра происходит снос акустического сигнала, поэтому рекомендуется размещать микрофоны в задней части специальных крыльев СТС, для устранения звукового ветрового удара по приемной части изделия.

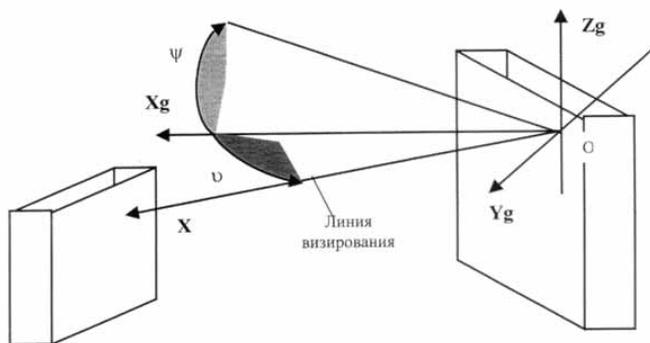


Рис. 117. Схема измерения углов линии визирования объекта на местности

Испытания проводятся при различной акустической базе (например,  $d = 0,29$  м;  $0,15$  м и  $0,45$  м либо  $d = 1,5$  м). Следует отметить, что при  $d = 0,15$  м результаты ухудшились, что подтвердило результаты испытаний в акустической трубе.

### Основные результаты испытаний АК СТС

В результате проведения стендовых испытаний лабораторного макета АК СТС было проведено более 400 экспериментов. На рис. 119. приведена корреляционная функция процесса при незначительном отклонении рупора от оси визирования объекта, из которого видно, что существует большое количество максимумов КФ. Первый максимум, расположенный вблизи нулевой отметки, соответствует положению рупора в соответствующей плоскости. Остальные максимумы соответствуют положению групп автомашин в момент остановки у семафора. Из анализа рисунков следует, что:

- максимальная дальность определения скоплений автомашин соответствует дальности более 1500 м (до 2000 м);
- отклонения измеренного положения скоплений техники от реального находится в пределах  $\pm 2^\circ$ ;
- крайние максимумы как слева, так и справа представляют собой переотражение акустического сигнала, так как приемная часть макета была выставлена в окне верхнего этажа здания и не могла измерить сигналы, находящиеся за пределами здания;
- в связи с высокой чувствительностью микрофонов приемной части АК СТС и широкой диаграммой направленности микрофонов требуется разработка алгоритма пеленгации истинного объекта, что возможно путем использования специальных фильтров.

Результаты обработки полученных экспериментальных записей, из которых можно сформировать табл. 39. Данные табл. 39 показывают, что точность измерения отклонения линии визирования на объект лежит в пределах  $\pm 2^\circ$ . Следует отметить, что в лабораторных условиях выделение рупора происходит в соответствии с теоретическими расчетами, приведенными в работах [7,8]. Испытания на местности требуют наличия дополнительной аппаратуры по точному определению взаимного расположения приемной и передающей частей (табл. 40).

На рис. 118-128 приведены результаты испытаний АК СТС при различных разворотах оси АК СТС. Поворот оси АК фиксировался специальным поворотным устройством. Затем на основании полученных сигналов с микрофонов проводился расчет корреляционной функции и величины угла поворота. Сравнение полученного результата с величиной поворота оси АК определяет точность системы.

Таблица 39. **Результаты испытаний в лабораторных условиях**

№ варианта	Номинальный угол поворота макета	Измеренный угол	Отклонение	Примечание
1	5°	7°13'	2°13'	Поворот оси влево
1	2°	1°15'	0°45'	Поворот влево
2	2°	0°31'	1°29'	Поворот вправо
3	4°	1°2'	2°58'	Поворот вправо
4	7°30'	7°55'	0°25'	Поворот влево
5	5°	4°8'	0°52'	Поворот вправо
6	7°30'	7°24'	0°26'	Поворот вправо
7	10°	12°42'	2°42'	Поворот вправо
8	0°	10°38'	0°44'	-
9	0°	10°38'	0°44'	-
10	10°	2°39'	2°31'	Поворот вправо
11	5°	15°54'	1°1'	Поворот вправо

Примечание. Приемная часть макета имеет ненулевые отклонения по тангажу и курсу относительно передающей части макета АК.

Учитывая новизну исследований АК авторы приводят такое количество рисунков с результатами исследований в лаборатории и на местности, чтобы было видно, что в условиях отклонения линии визирования на маяк в пределах  $\pm 30^\circ$  АК устойчиво определяет углы в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях с точностью до двух градусов. Повысить точность АК можно за счет увеличения акустической базы  $d$  и частоты дискретизации акустического сигнала.

Таблица 40. **Результаты моделирования акустического сигнала**

$d$ , мм	$dt$ , с	$D$ , м	$\Delta\psi$	$\pm\psi$	Примечание
0,15	$2 \cdot 10^{-6}$	1500	6'	3°	$d$ - акустическая база; $dt$ – интервал дискретизации снятия сигналов с аналого-цифрового преобразователя; $D$ – дальность действия канала; $\Delta\psi$ - чувствительность канала; $\pm\psi$ - точность канала
0,29	$2 \cdot 10^{-6}$	1500	6'	2°	
0,45	$2 \cdot 10^{-6}$	1500	6'	2°	
0,29	$2 \cdot 10^{-7}$	1500	6''	1,5°	Стоимость платы с $dt=2 \cdot 10^{-7}$ на порядок дороже плат в вариантах 1—3.
0,45	$2 \cdot 10^{-7}$	1500	6''	1,5°	Устойчивое распознавание полезного сигнала

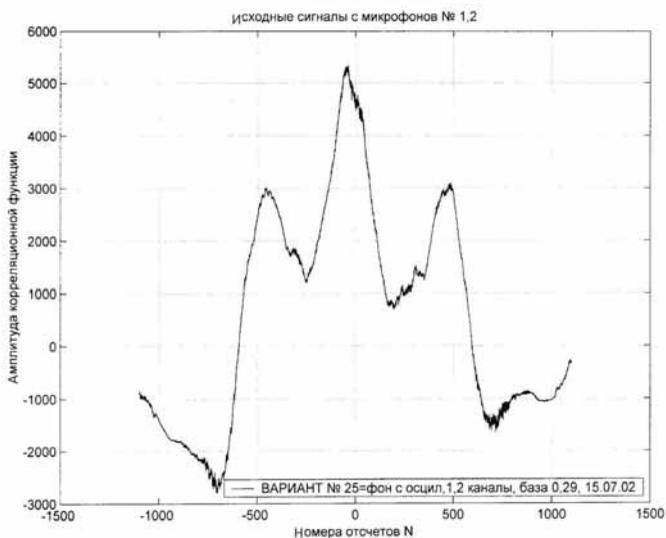


Рис. 118. Фон, движение автомашин на Каширском шоссе ослабленное

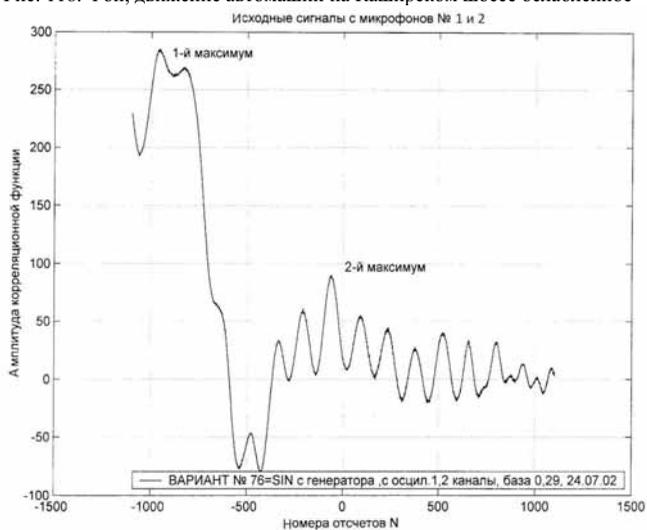


Рис. 119. Максимумы корреляционной функции соответствуют положению имитатора маяка (на частоте 3,5 кГц; угол =  $5,12^\circ$ ) и положению на Каширском шоссе (на частоте 0,5 кГц; угол =  $85,4^\circ$ ; дальность обнаружения  $2000 \pm 50$  м)

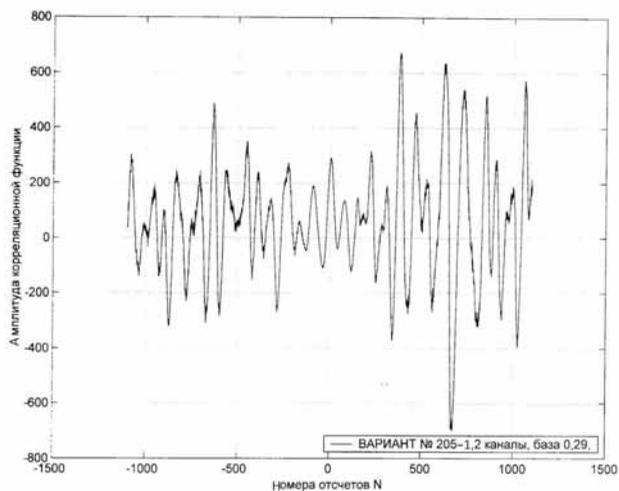


Рис. 120. Сигнал поступает с передающей части макета через рупоры;  
Номинал  $0^\circ$ ; результат  $0,69^\circ$

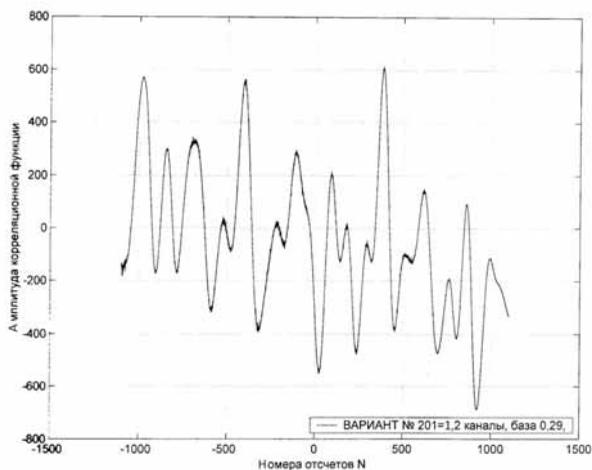


Рис. 121. Сигнал поступает с передающей части макета через рупоры;  
Номинал 1 град; результат 0,83 град.

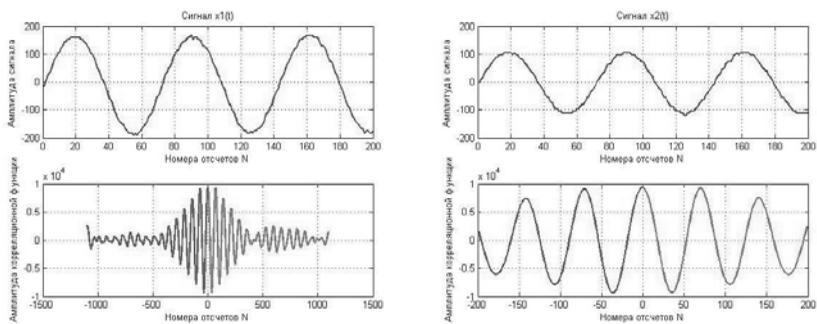


Рис. 122. Запись акустических сигналов с помощью программы la2dSK.exe, 3-й и 4-й каналы, угол поворота  $0^\circ$  в вертикальной плоскости

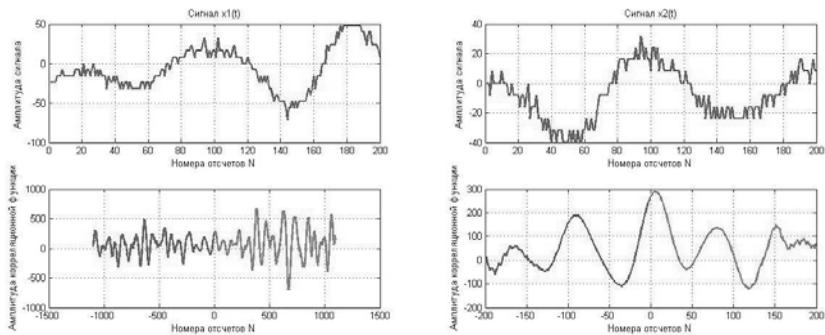


Рис. 123. Запись акустических сигналов с помощью осциллографа, 3-й и 4-й каналы, угол поворота  $3^\circ$  в вертикальной плоскости, вверх

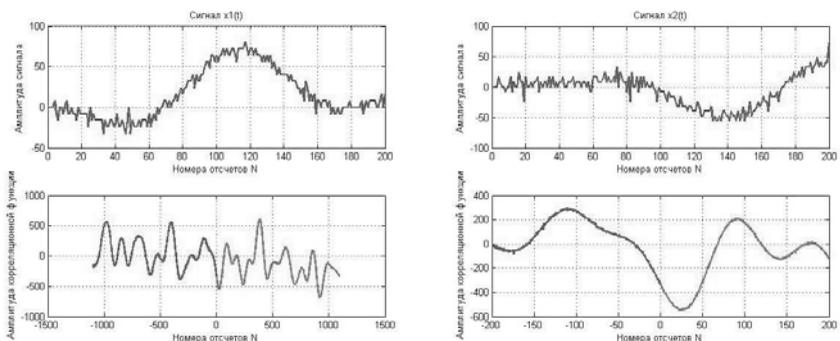


Рис. 124. Запись акустических сигналов с помощью программы la2dSK.exe, 1-й и 2-й каналы, угол поворота  $23,5^\circ$ , вправо

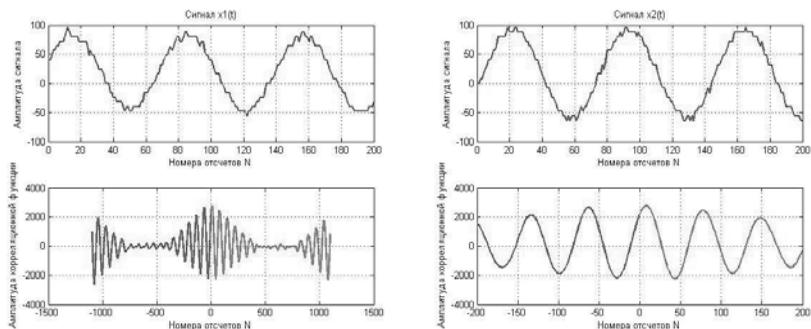


Рис. 125. Запись акустических сигналов с помощью программы la2dSK.exe, 3-й и 4-й каналы, угол поворота  $3^\circ$ , вверх

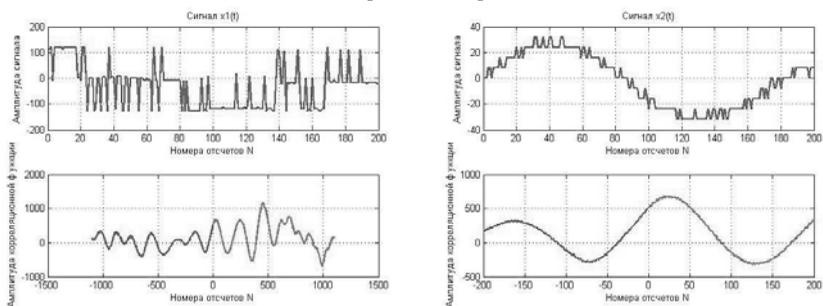


Рис. 126. Запись акустических сигналов с осциллографом, 1-й и 2-й каналы, угол поворота  $6^\circ$ , вправо

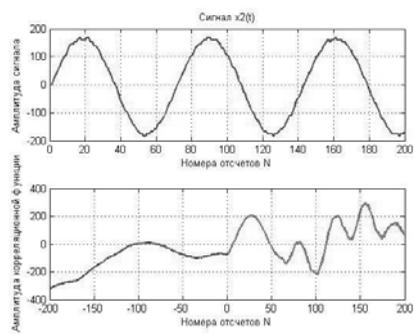
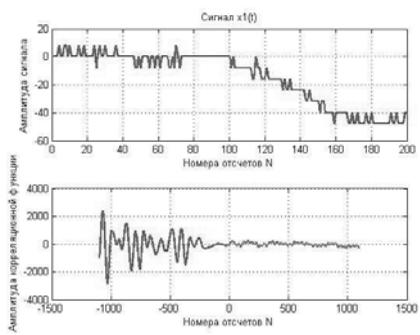


Рис. 127. Запись акустических сигналов с осциллографа, 3-й и 4-й каналы, угол поворота  $7^\circ$ , вверх

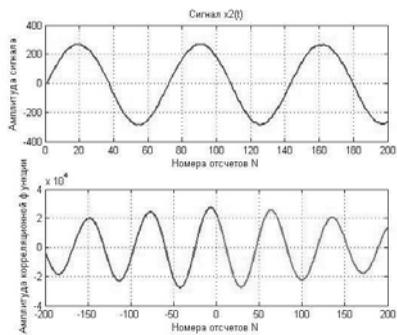
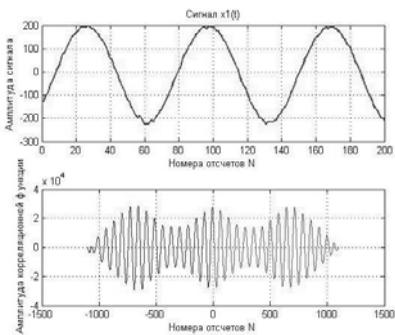


Рис. 128. Запись акустических сигналов с помощью программы la2dSK.exe, 3-й и 4-й каналы, угол поворота  $2^\circ$ , вниз

### **Экспериментальные исследования АК СТС в акустической трубе**

Для экспериментального исследования аэродинамических шумов акустической системы необходимо использовать телеметрический макет СПС.

Для обеспечения измерений в безэховой камере в требуемых диапазонах частот (3...6 кГц) необходимо разработать полосовой усилитель с переключением полосы пропускания. Усилитель монтируется на печатной плате в стакане из алюминиевого сплава, помещенном в цилиндрическую часть телеметрического отсека изделия.

Экспериментальное исследование проводится на акустической установке. Акустической поток создается электровентиляторами. На акустической установке можно получать поток со скоростью, ограниченной производительностью электровентиляторов, но время эксперимента не лимитируется. Структурная схема измерительной части установок приведены на рис. 129.

Измерительная часть акустической установки располагается в камере, стены которой покрыты звукопоглощающей изоляцией. В состав измерительной части входят сопло прямоугольного сечения, точный импульсный шумомер 00017 фирмы Robotron с измерительным микрофоном МК221, персональный компьютер Getak (заводской номер Е60950), макет образца СТС с двумя микрофонами М4Б2 и усилителями, генератор внешнего акустического сигнала.

Сигнал, создаваемый генератором и динамиком, является полезным сигналом. Воздушный поток, истекающий из сопла акустической установки, создает на поверхности макета образца СТС шумы, которые совместно с полезным сигналом измеряются внешним микрофоном и микрофонами М4Б2, называемыми в дальнейшем датчиками 1, 2. Сигналы, вырабатываемые микрофонами и усилителями, подаются в компьютер, где они запоминаются для дальнейшей обработки в виде спектрограмм.

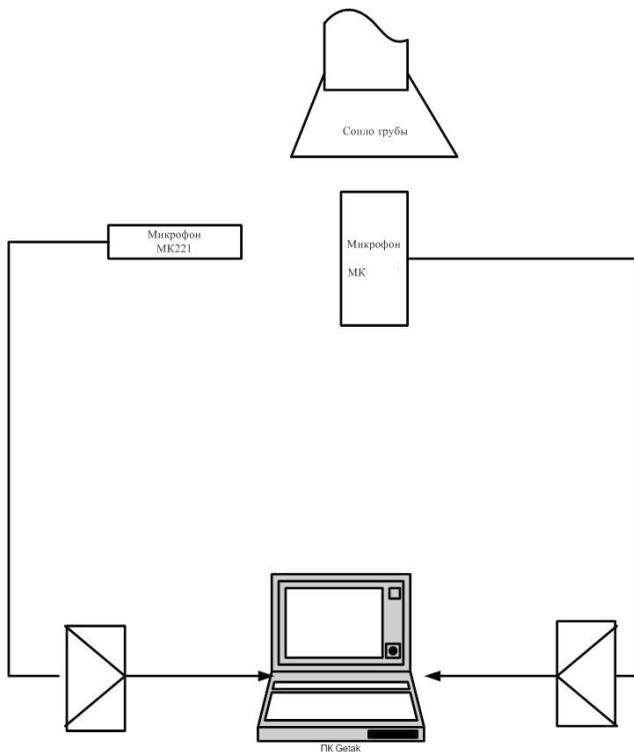
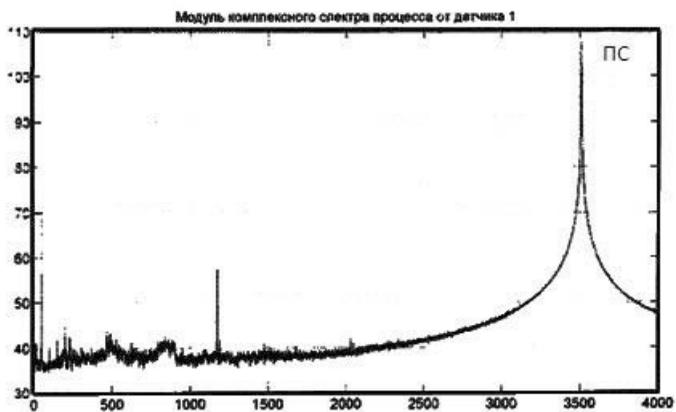


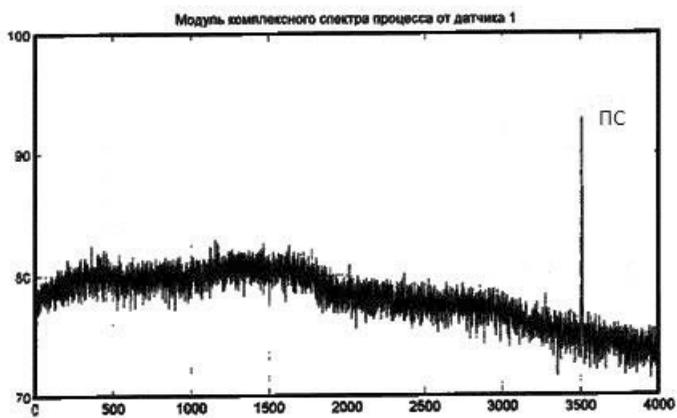
Рис. 129. Структурная схема акустической установки

Шумомер с помощью внешнего микрофона МК221 измеряет шум обтекания снаряда и полезный сигнал на расстоянии 1м от оси сопла в плоскости выходного сечения сопла. Шум обтекания непосредственно на обшивке макета измеряется микрофоном М4Б2 и через усилитель подается на анализатор спектра. Полезный сигнал создается с помощью задающего генератора и динамика.

Во время эксперимента макет образца СПС устанавливается перед соплом на акустической установке - 40 м/с и 80м/с;



а



б

Рис.130. Результаты испытаний в акустической трубе. Превышение полезного сигнала (ПС) над шумом 40...50 дБ: *а* – пробный сигнал. Шаг по частоте 1 Гц. Усреднение по 30 реализациям; *б* – Скорость обтекания 40 м/с. Шаг по частоте 1 Гц. Усреднение по 30 реализациям

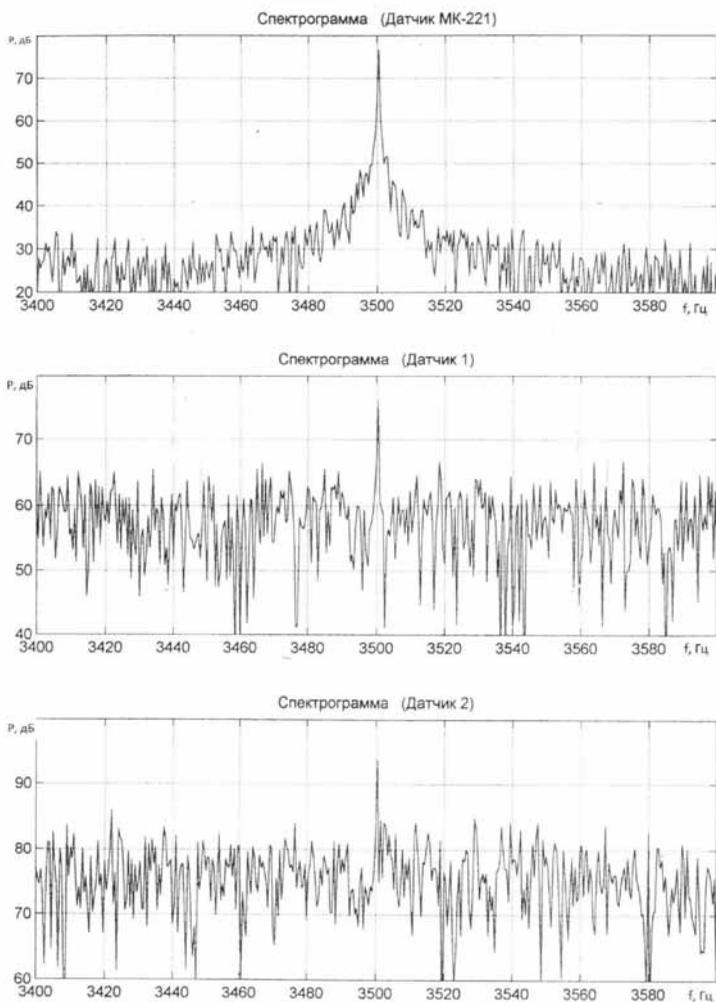


Рис. 131. Результаты испытаний в акустической трубе

Таким образом, результаты испытаний в акустической трубе (рис. 130 – 131) можно сформировать следующим образом:

1. Амплитуда полезного сигнала, фиксируемого датчиками 1, 2 и внешним

микрофоном, практически не увеличивается по показаниям спектрограмм при увеличении мощности по шкале генератора.

2. При скоростях потока 40 , 80 м/с полезный сигнал выделяется на спектрограммах шума обтекающего потока, который фиксируется датчиками 1 и 2 непосредственно на поверхности макета.

3. На соотношение амплитуды полезного сигнала и шума влияют конструкция и материалы крепления внутреннего микрофона.

\*\*\*

В главе приведен пример проектирования акустического канала СПС с применением системного анализа, описанного в главах 1-4. Акустический канал был выбран в качестве примера ввиду новизны и уникальности разработки подобного канала. В дополнении к материалам работ [7, 8] данный материал позволяет разработать АК для применения не только на СПС, но и других не менее интересных сложных системах.

## **Глава 7. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ**

### **7.1. Общие сведения**

Практически любой объект (гражданский или военный) во время своей эксплуатации испытывает противодействие – естественное и/или искусственное. Систематизация видов противодействия позволяет учесть их на этапах проектирования и эксплуатации СТС. Учет данных факторов позволяет разработать СТС, более надежную к противодействию.

В данной книге рассматриваются в основном СТС народнохозяйственного назначения (гражданские), использующие системы управления и информационные блоки различного типа. В главах 1-6 было показано, что противодействие (ПРД) может быть естественным или искусственным. Естественное ПРД одинаково для военных и гражданских СТС – погодные условия, климатические воздействия и т.п. Искусственное ПРД для военных и гражданских СТС различаются. Для СТС народнохозяйственного назначения искусственное ПРД может быть вызвано либо конкурентной борьбой, либо террористическими актами.

Специальные методы и методики расчета и проектирования систем противодействия для таких СТС отсутствуют. В связи с этим целесообразно применять методы и методики, используемые при проектировании военных изделий, но с учетом особенностей функционирования СТС народнохозяйственного назначения.

В настоящее время все больше внимания уделяют радиоэлектронной борьбе (РЭБ) представляющей собой комплекс согласованных мероприятий и действий войск, которые проводятся в целях:

- снижения эффективности управления войсками и применения оружия противника;
- обеспечения заданной эффективности управления войсками;
- применения своих средств поражения.

В подтверждении важности РЭБ является заявление заместителя гендиректора Концерна «Радиоэлектронные технологии» (КРЭТ) - Российские средства радиоэлектронной борьбы (РЭБ) способны нейтрализовать любое оружие [64].

Одним из последних прецедентов, с участием средств РЭБ является случай, когда комплекс “Хибины” установленный на российском самолете Су-24, в апреле 2014 года 12 раз сымитировавший атаку на эсминец ВМС США «Дональд Кук», находившийся в Черном

море. Беспомощность американских моряков объяснялась тем, что на их корабле отказала новейшая электронная система управления вооружением «Иджис».

Таким образом, при проектировании СТС необходимо учитывать и акцентировать особое внимание на возможное воздействие системы средствами РЭБ потенциального противника. Значимой и главной задачей данной главы является анализ возможных воздействий на СТС и предлагаемые меры защиты от этих воздействий.

Под рассматриваемым воздействием понимается радиоэлектронное подавление - это комплекс мероприятий и действий по срыву (нарушению) работы или снижению эффективности применения радиоэлектронных систем и средств путем воздействия на их приемные устройства радиоэлектронными помехами и включает радио-, радиотехническое, оптико-электронное и гидроакустическое подавление. Радиоэлектронное подавление обеспечивается созданием активных и пассивных помех, применением ложных целей, ловушек и другими способами.

Под мерами защиты понимается радиоэлектронная защита (РЭЗ) - это составная часть радиоэлектронной борьбы, направленная на обеспечение устойчивой работы радиоэлектронных средств (РЭС) в условиях воздействия преднамеренных радиопомех, электромагнитных излучений оружия функционального поражения, электромагнитных и ионизирующих излучений, возникающих при применении ядерного оружия, а также в условиях воздействия непреднамеренных радиопомех.

Задачами РЭЗ являются:

- обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭС;
- проведение комплекса организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение помехоустойчивости РЭС в условиях воздействия на них непреднамеренных помех;
- защита РЭС от преднамеренных помех;
- проведение комплекса организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение помехозащищенности РЭС в условиях воздействия на них преднамеренных помех;
- защита РЭС от электромагнитных и ионизирующих излучений;
- проведение комплекса организационных и технических мероприятий по обеспечению надежности функционирования РЭС в условиях воздействия на них излучений, приводящих к функциональному поражению элементной базы;
- защита от воздействия ложных сигналов;

- проведение комплекса организационных и технических мероприятий, направленных на воспрепятствование возможности ввода в системы и средства информации (сообщений) при передаче им ложных сигналов.

С учетом сказанного ниже рассматриваются различные подходы к оценке систем ПРД, позволяющие учесть полученные результаты при проектировании СТС.

## **7.2. Виды противодействия**

### **7.2.1. Общие сведения**

**Противодействие** – это конкретная реакция на действие (функционирование) определенной СТС. Характер реакции определяется как состоянием противодействующей стороны, так и параметрами СТС. В данном разделе под противодействием СТС понимаются не только помехи (рис. 132), препятствующие нормальной работе технических средств и вызывающие отклонения параметров их работы, но и такие внешние воздействия, как климатические, природные и т.п. Цель противодействия – снизить эффективность функционирования СТС, в том числе и за счет снижения различных его параметров.

Противодействия любых видов затрудняют работу СТС и приводят в итоге к снижению возможности распознавания полезного сигнала. Кроме этого, ухудшаются такие параметры, как дальность действия СТС и качество приема радиосигналов.

Наибольшее значение здесь имеют электромагнитные помехи, которые могут привести к следующим последствиям: выходу из строя отдельных блоков и целых приборов, к сбоям и отказам в работе устройств, к самозапуску и самопроизвольной остановке устройств, к полной потере данных в компьютерных системах, к изменению параметров СТС.

*Электромагнитные помехи* – нежелательные факторы электрического, магнитного или электромагнитного поля, электрического тока или напряжения, нарушающие работу устройств или вызывающие изменение их технических характеристик. Источником электромагнитных помех может стать любое электромагнитное явление, происходящее в природе или каком-либо электротехническом или радиоэлектронном приборе.

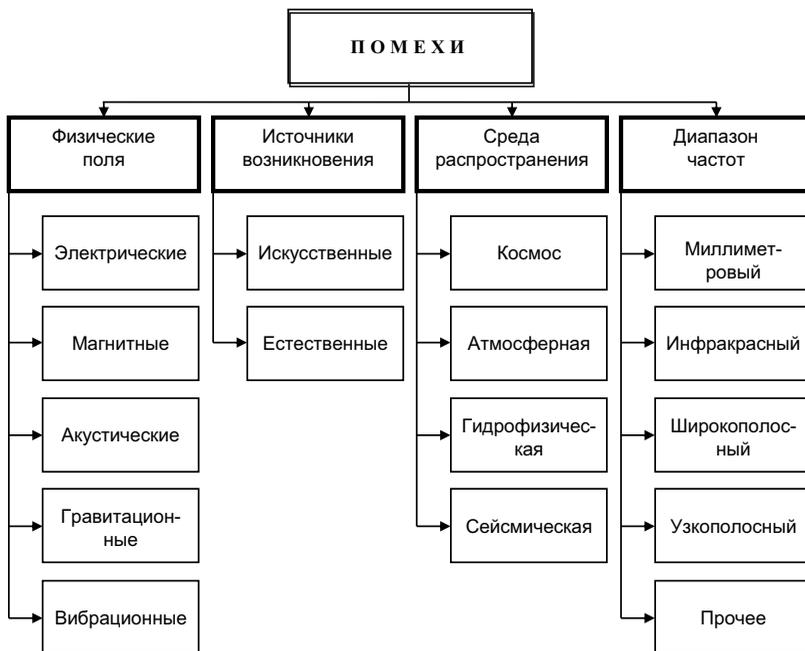


Рис. 132. Схема помех СТС

### 7.2.2. Естественное противодействие

К видам естественного противодействия относят:

- космические шумы, реликтовое излучение;
- радиоизлучение Земли и объектов Солнечной системы;
- атмосферные помехи Земли;
- фоны и природные образования;
- климатические помехи;
- погодные помехи.

Рассмотрим некоторые виды противодействия.

#### Оценка коэффициента круглосуточности применения систем

На функционирование систем оказывают воздействие метеорологические, временные и сезонные условия [65, 66].

Так, комплексы с телевизионными системами наведения не могут применяться ночью и в сумерки, если освещенность подстилающей поверхности менее некоторого порогового значения. Например, на территории Центральной Европы продолжительность темного времени суток с октября по февраль составляет от 58 до 74 % (в среднем 66 %), а с апреля по июль – от 43 до 33 % (в среднем 38 %) от суммарного времени суток (данные приводятся для 30° северной широты за 25 лет наблюдений).

Пользуясь графиками или используя зависимости можно рассчитать распределение длительности времени суток с освещенностью не менее заданного порогового значения по сезонам года для определенной географической широты (рис. 133). Из рис. 133 следует, что освещенность не менее 50 лк, необходимая для нормального функционирования систем с телевизионными системами наведения, обеспечивается летом на 65 % от времени суток и на 35 % – зимой.

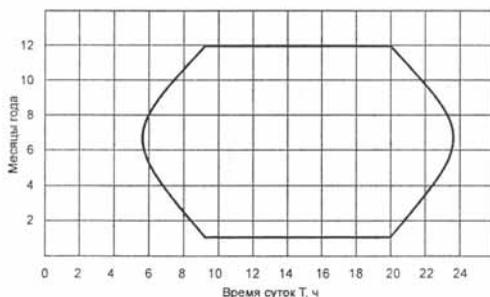


Рис. 133. Распределение длительности светлого времени суток по сезонам на географической широте г. Ахтубинска Астраханской области

### Оценка коэффициента всепогодности применения систем

Функционирование лазерных, телевизионных и в меньшей степени тепловизионных систем наведения зависит от оптического состояния воздуха и продолжительности такого состояния в районе функционирования[65]. Различают следующие основные типы оптического состояния воздуха: мгла, туманная дымка, туман, дымка с моросью. Кроме того, отдельно рассматриваются облака, дождь и снегопад. Состояния воздуха различаются по дальности видимости, размеру частиц и их концентрации.

Длительность характерных для европейской части различных состояний погоды в процентах по отношению ко времени года (P) показана в табл. 41. Длительность подсчитана

по результатам десятилетних наблюдений на метеостанции «Подмосковная» за период 1961–1970 годы (принятый за 100 %). В табл. 41 параметр  $S_m$  – метеорологическая дальность видимости (МДВ) определяется как расстояние, на котором фотометрический контраст наблюдаемого объекта равен порогу контрастной чувствительности глаза, мало зависящий от индивидуальности наблюдателя и условий освещения.

По другому определению, МДВ, – условная характеристика прозрачности атмосферы, представляющая собой расстояние, на котором под воздействием атмосферной дымки теряется видимость абсолютно черного объекта, имеющего угловые размеры не менее  $0,3^\circ$ .

Таблица 41. Длительность различных состояний погоды в процентах по отношению ко времени года

МДВ $S_m$ , км	Продолжительность метеоявлений P, %						
	Дождь	Мокрый снег, метель	Снег, метель	Туман	Дымка	Без явлений	Сумма
<0,05	–	–	–	0,1	–	–	<b>0,1</b>
0,05–0,2	–	–	–	0,4	–	–	<b>0,4</b>
0,2–0,5	0,1	0,1	–	0,4	–	–	<b>0,6</b>
0,5–1,0	0,1	0,1	0,2	1,2	–	–	<b>1,6</b>
1–2	0,5	0,3	0,4	2,9	0,1	–	<b>4,2</b>
2–4	0,1	0,1	0,1	0,3	–	–	<b>0,6</b>
4–10	1,1	1,6	2,8	–	37,9	–	<b>43,4</b>
10–20	0,1	0,2	0,3	–	10,6	8,6	<b>19,8</b>
20–50	0,1	0,2	0,5	–	0,6	27,1	<b>28,5</b>
>50	–	–	–	–	0,1	0,7	<b>0,8</b>
<b>Сумма</b>	<b>2,1</b>	<b>2,6</b>	<b>4,3</b>	<b>5,3</b>	<b>49,3</b>	<b>36,4</b>	<b>100%</b>

Для тепловизионных систем наведения дымка почти не является препятствием к функционированию. Однако на них влияют атмосферные осадки, которые уменьшают прозрачность атмосферы и тепловую контрастность маяка относительно подстилающей поверхности. Из табл. 41 следует, что продолжительность дождя, мокрого снега и снега с метелью составляют 9 % от суммарного времени (года). В связи с этим, например, для тепловизионных систем наведения коэффициент всепогодности принимается равным 0,9–0,92 [65].

Считается, что атмосферные осадки практически не влияют на работоспособность радиолокационных систем наведения, поэтому их коэффициент всепогодности равен 1,0.

#### Степень всепогодности

Погодные условия накладывают существенные ограничения на функционирование СТС с информационными блоками. Системы наведения (оптического, электронно-

оптического, телевизионного, инфракрасного и радиолокационного типов) в значительной мере зависят от характеристики состояния и замутненности земной атмосферы, характеризуемой метеорологической дальностью видимости  $S_m$ . Связь между  $S_m$  и состоянием атмосферы представлена в табл. 42.

Таблица 42. Градация состояний атмосферы\*

Состояние атмосферы (видимость)	Балл по коду	Метеорологическая дальность видимости $S_m$ , км
Туман очень сильный	0	Менее 0,05
Туман сильный	1	0,05...0,2
Туман заметный	2	0,2...0,5
Туман слабый	3	0,5...1
Дымка очень сильная	4	1...2
Дымка сильная	5	2...4
Дымка заметная	6	4...10
Дымка слабая	7	10...20
Хорошая видимость	8	20...50
Отличная видимость	9	50 и более

\* Различные полезные сведения о составе атмосферы и влиянии на условия действия авиации различных метеорологических элементов погоды приведены в книге: Кравченко И.В. Летчику о метеорологии. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: Воениздат, 1982 – 255с.

Степень всепогодности определяется способностью используемой системы выполнять возложенные на нее функции в различных погодных условиях. Зная суммарное время проявления тех или иных метеорологических явлений в течение года, можно определить вероятность нормального функционирования СТС, оснащенной информационным блоком ИБ определенного типа, а также степень всепогодности ее применения. Степень всепогодности применения системы определяется по формуле

$$B = V_{\text{прим}} / 100,$$

где  $V_{\text{прим}}$  – суммарное время (в процентах относительно года) возможности применения системы. Данный параметр характеризует степень возможности функционирования системы при различных метеоусловиях (дождь, снег, туман, дымка).

Ограничения в применении систем с лазерными и телевизионными ИБ наступают при появлении сильной дымки и других сложных метеоусловий, с тепловизионными ИБ – при появлении сложных метеоусловий, составляют около 9–10% от длительности года. Что же касается радиолокационных ИБ, то их работа прекращается лишь при сильном дожде и практически показатель  $B$  можно считать равным 1.

Коэффициенты степени всепогодности на Европейском ТВД приняты для систем при МДВ, равной 10 км и использовании следующих ИБ:

- лазерного и телевизионного – 0,49;
- тепловизионного (для диапазона 8–14 мкм) – 0,92;

— радиолокационного – 1,0.

### **Степень облачности**

Облака являются также важным метеорологическим фактором, определяющим эффективность использования ИБ СТС. Облака принято различать по их количеству, форме и высоте расположения относительно уровня моря.

Количество облаков характеризуется (в зависимости от степени покрытия ими неба) баллами от 0 до 10. Для разных географических зон количество баллов облачности будет разным (табл.43).

Облака по уровню расположения их нижней границы относительно уровня моря делятся на три яруса: нижний (< 2000 м), средний (2000–6000 м) и верхний (> 6000 м).

**Таблица 43. Распределение облачности в Северном полушарии (в процентах)**

Континенты (акватории)	Количество баллов облачности		
	0-2 балла	2-8 баллов	8-10 баллов
Северная Африка, юго-западные штаты США, северо-западная часть Индостана, Аравийский полуостров, Средняя Азия	55-68	34-16	11-16
Атлантика, западная часть Тихого океана, западная часть Арктики, западная часть Канады, Алеутские острова, юго-западная Азия, восточная часть Японского моря	5-7	40-33	55-60
Север Европы	8-16	37-24	55-60
Юг Европы	8-18	70-57	22-27
Запад США	27	62-46	11-27
Восток США	27	46-35	27-38

В Европе облачность с нижней кромкой до 600 м наблюдается от 130 до 190 дней в году. При этом повторяемость присутствия облаков высотой до 200 м равна 11–38 % от покрытия ими неба.

Радиолокационные ИБ обеспечивают наведение СТС даже в условиях сплошной облачности над поверхностью суши или моря.

Возможность наведения систем с разных высот и при отсутствии облачности для данного географического положения и времени года можно определить как вероятность отсутствия на небе облаков на различных высотах применения.

В табл. 44 приведены значения коэффициента показателя «Степень облачности» для систем с различными типами ИБ при применении с различных высот и в разное время года.

Таблица 44. Значения коэффициента показателя «Степень облачности» для систем с различными типами ИБ

Высота применения Н, км	Время года	Тип системы наведения				
		лазерная	телевизионная	тепловизионная	телевизионно-командная	радиолокационная
0,6	лето	0,85	0,85	0,85	0,85	1,0
	зима	0,55	0,55	0,55	0,55	1,0
2,0	лето	0,56	0,56	0,56	0,85	1,0
	зима	0,28	0,28	0,28	0,55	1,0
3,0	лето	0,48	0,48	0,48	0,85	1,0
	зима	0,23	0,23	0,23	0,55	1,0
5,0	лето	0,46	0,46	0,46	0,85	1,0
	зима	0,18	0,18	0,18	0,55	1,0

Рассмотрим модель атмосферного канала. Коэффициент пропускания атмосферы  $K_{\text{атм}}$  зависит от ослабления излучения, обеспечиваемого атмосферой, и длины атмосферного канала [1]:

$$K_{\text{атм}} = \exp(-\beta \cdot D),$$

где  $\beta$  – коэффициент ослабления излучения, обеспечиваемого атмосферой;

$D$  – дальность до объекта, т.е. длина трассы распространения излучения в атмосферном канале.

Неоднородность атмосферы для ИБ можно учесть кусочной аппроксимацией функции  $\beta(D)$ :

$$K_{\text{атм}} = \exp\left(-\sum_{i=1}^{N_a} \beta_i \Delta D_i\right),$$

где  $N_a$  – число слоев атмосферы с постоянным коэффициентом ослабления.

Для оценки ослабления излучения атмосферой использовался метод эмпирических коэффициентов, полученных на основе экспериментальных данных. Например, ослабление оптического излучения диапазона длин волн  $0 < \lambda < 10$  мкм описывается уравнениями

$$\beta(\lambda) = \beta(0,55) \cdot (n_0 + n_1 \lambda^{-n_2}),$$

$$\beta(0,55) = 3,91 / \text{МДВ},$$

где  $\beta(0,55)$  – коэффициент ослабления на длине волны  $\lambda = 0,55$  мкм;

$n_0, n_1, n_2$  – эмпирические коэффициенты для различных условий оптической видимости (табл. 45).

Таблица 45. Эмпирические коэффициенты для различных условий оптической видимости

Период	Погода	$n_0$	$n_1$	$n_2$
Летний	Дымка (после дождя)	0	0,4	1,88
	Устойчивая дымка	0,06	0,36	1,88
Весенне-осенний	Дымка	0,1	0,45	1,3
	Туманная дымка	0,01	0,8	0,5
	Дымка с моросью	0,3	0,5	0,6
Зимний	Ледяная дымка	0,25	0,45	1,23
	Дымка со снегом	0,77	0,15	1,24

### 7.2.3. Искусственное противодействие

К видам искусственного противодействия функционированию СТС следует отнести:

- индустриальные или промышленные помехи – излучение промышленных установок, бытовых электроприборов и т.д.;
- контактные помехи, возникающие при переходных процессах;
- стационарные помехи, возникающие от работы от других радиоэлектронных средств: радиостанций, радиолокаторов и т.д.;
- ложные тепловые цели;
- искусственные туманы и различные ослепляющие средства;
- пиротехнические помехи.

На рис. 134 приведена классификация радиоэлектронных помех [67].

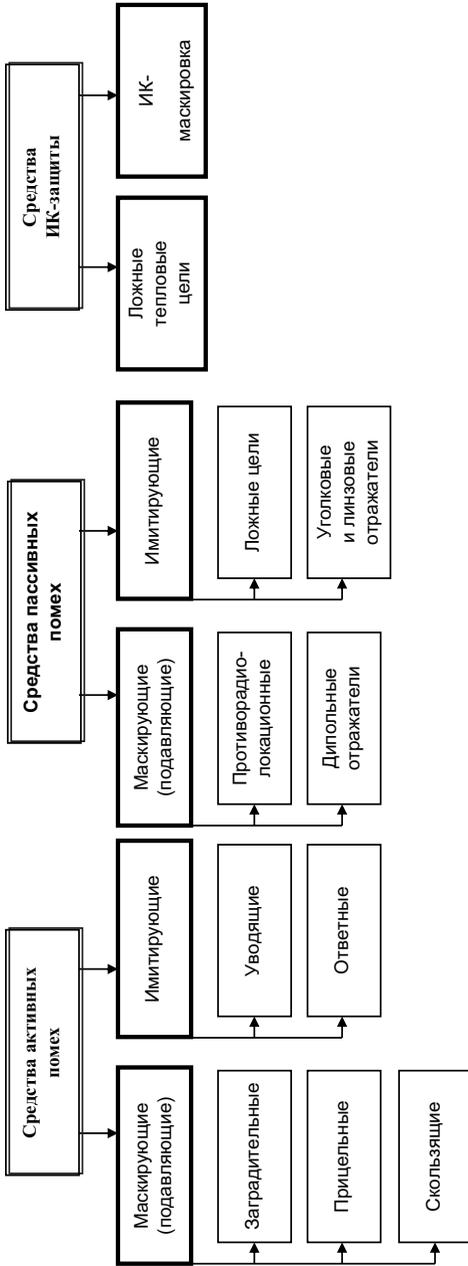


Рис. 134. Классификация радиоэлектронных помех

Организованные электронные помехи принято делить на активные и пассивные.

Активные помехи создаются с помощью специальных передатчиков помех, излучающих электромагнитную энергию в диапазоне частот работы подавляемых радиоэлектронных средств. Под воздействием активных помех происходит искажение, маскировка или потеря полезного сигнала. Их эффективность зависит от энергетических, частотных и временных соотношений параметров помехи и подавляемого устройства.

Активные помехи различаются по ряду признаков:

- по способу модуляции высокочастотного сигнала помехи (немодулированные, шумовые, импульсные);
- по временным и фазовым соотношениям с излучаемыми сигналами подавляемого радиолокационного средства (ответная, синхронная, несинхронная);
- по ширине спектра излучаемой помехи (прицельная, заградительная, скользящая).
- Немодулированные помехи в настоящее время не имеют широкого распространения.

Шумовая помеха создается путем модуляции колебаний генератора помех хаотическими шумами. Эту помеху очень трудно отфильтровать в приемном тракте ИБ СТС, так как изменения амплитуды, частоты и фазы излучаемого сигнала случайны. Шумовые помехи наиболее эффективны из всех видов непрерывных электронных помех.

Мощность отраженного от носителя помех сигнала обратно пропорциональна дальности в четвертой степени, а мощность помехового сигнала – квадрату дальности. Следовательно, с изменением расстояния мощность полезного сигнала изменяется более быстро, чем мощность помехи [67].

Помеха эффективна, если

$$K = \frac{P_{п.вх.}}{P_{с.вх.}} \geq K_n,$$

где  $P_{п.вх.}$ ,  $P_{с.вх.}$  – соответственно мощности помехи и полезного сигнала на входе приемника радиолокационной станции соответственно;

$K_n$  – коэффициент подавления полезного сигнала ИБ СТС данным видом помехи.

В зависимости от ширины спектра частот излучаемого сигнала помехи принято делить на прицельные и заградительные.

Ширина спектра излучаемой частоты прицельной помехи сравнительно невелика. Передатчик помех должен достаточно точно настраиваться на частоту подавляемого радиоэлектронного устройства. Однако создание узкополосной помехи позволяет получить большую плотность ее мощности.

Хаотические импульсные помехи наблюдаются на экранах индикаторов в виде большого количества отметок, положение, а также амплитуда и длительность которых изменяются по случайному закону.

Пассивные помехи создаются с помощью различного рода искусственных отражателей. Они предназначены для маскировки полезного сигнала или его имитации (создания ложных целей).

Наиболее распространенным способом создания пассивных помех является рассеивание в пространстве пачек дипольных отражателей (металлизированные ленты или стекловолокно). Максимальное отражение электромагнитной энергии такими пачками наблюдается при длине отражателей, примерно равной длине волны подавляемого радиолокационного устройства. Степень маскировки полезного сигнала зависит от концентрации отражателей в пространстве и разрешающей способности подавляемой ИБ. Количество дипольных отражателей в пачке выбирается таким образом, чтобы ее эффективная отражающая поверхность после рассеивания была примерно равна эффективной отражающей поверхности прикрываемой цели.

Создание облака пассивных помех осуществляется с помощью автоматов сброса пачек отражателей или ракет (снарядов), выстреливаемых в переднюю полусферу.

Один из существенных недостатков пассивных помех – сравнительно малое время их воздействия на подавляемые радиоэлектронные средства [67]. Время их действия зависит от высоты сбрасывания, скорости ветра, метеорологических условий. Поэтому постановка помех и удар средств воздушного нападения должны быть строго согласованы по времени и месту.

**Командная радиолиния в системах телеуправления.** В настоящее время широко применяется беспилотный летательный аппарат (БЛА и ДПЛА), которые управляются с командного пункта управления.

Командная радиолиния в системах телеуправления обеспечивает передачу команд управления с пункта наведения на борт носителя. Она является звеном контура наведения. Всякое нарушение ее работы непосредственно сказывается на возможностях СТС по выполнению поставленных задач. СТС может использоваться для доставки робототехнических комплексов (РТК), управление которыми тоже ведется с командного пункта (либо с носителя).

Для противодействия работе командных радиолиний управления могут быть созданы имитационные, шумовые и хаотические импульсные помехи.

Имитационная помеха по своей структуре аналогична сигналу, излучаемому радиопередатчиком команд. Разработка аппаратуры имитационных помех возможна лишь

при наличии данных о частотах, кодах и параметрах подавляемой линии радиуправления. Работа такой аппаратуры может быть основана на приеме, дешифрации, задержке и переизлучении команд управления. Результат действия помехи – срыв наведения РТК.

Шумовые и хаотические импульсные помехи могут вызывать:

- ложные срабатывания дешифратора;
- полное или частичное подавление и искажение команд управления.

Эффективность действия помех при заданной структуре полезного сигнала существенно зависит от энергетического соотношения помехи и сигнала.

Скользящая помеха (квазизаградительная) представляет собой маскирующую помеху, имеющую сравнительно узкий спектр с быстрым изменением несущей частоты. Она создается передатчиком помех с перестраиваемой частотой излучения. Имея большую плотность мощности, скользящая помеха по своему воздействию близка к прицельной.

Пассивные помехи – мешающие сигналы, создаваемые отражением радиоволн телами. В качестве таковых могут использоваться дипольные отражатели, уголковые отражатели и др.

Маскирующие помехи могут создаваться путем сбрасывания с самолета полуволновых дипольных отражателей, представляющих собой металлизированные нити из нейлона, стекловолокна, металлизированной бумаги и др. Облако дипольных отражателей имеет эффективную поверхность рассеяния

$$\sigma_o = N \cdot \sigma_d,$$

где  $N$  – количество диполей в облаке;

$\sigma_d = 0,17 \lambda^2$  – величина эффективной поверхности рассеяния одного полуволнового диполя ( $\lambda$  – длина волны передатчика).

Еще одним видом противодействия является материалы – поглощающие и маскирующие.

*Поглощающие материалы* могут наноситься на маскируемую поверхность в виде многослойных покрытий, что значительно снижает отражение радиоволна и создает большое поглощение их энергии. Интерференционные покрытия ослабляют энергию отраженной волны в несколько десятков раз, значительно снижая эффективную, площадь отражения маяков.

**Противодействие инфракрасным блокам комплексов** осуществляется различными способами. Основные из них следующие:

1. Сбрасывание тепловых ловушек, способных перенацеливать на себя системы с инфракрасными головками самонаведения. В качестве ложных тепловых целей используются пиротехнические шашки и осветительные ракеты [67]. По сообщениям иностранной печати для сбрасывания тепловых ловушек могут применяться устройства, используемые для постановки пассивных помех (сбрасывание пачек дипольных отражателей).

2. Создание дымовых завес, значительно ослабляющих инфракрасное излучение носителя. Замутнение атмосферы между носителем и системой с тепловой головкой приводит к срыву наведения систем. По сообщениям печати, в качестве дымообразующего вещества, например, в США используется четыреххлористый титан.

3. Применение тепловых экранов, инфракрасных отражающих покрытий и т.д.

Определение эффективности противодействия может быть проведено несколькими способами:

- сравнением вариантов средств противодействия (окраски, эмалей, покрытий и т.п.) с помощью спектрального метода, подробно изложенного в работах [11–14], в результате рассчитывается комплексный показатель средства;
- расчетом эффективности покрытий (и других рассмотренных средств и методов) с помощью методики, приведенной в подразделе 1.3.3. Определяются величины  $\Delta B_m$ ,  $\Delta S_m$ : среднее приращение яркости и эффективная площадь излучения объекта (рассчитываются по заданным техническим характеристикам покрытий и т.п.), а также значение спектрального коэффициента отражения в соответствующем диапазоне длин волн.

Приведенные показатели эффективности дополняют друг друга и позволяют полностью оценить эффективность средств противодействия. Следует отметить, что для некоторых средств данные показатели приходится оценивать с привлечением экспертов, ввиду отсутствия соответствующих математических моделей для их расчета.

### 7.3. Методика учета внешних воздействий

#### 7.3.1. Пример расчета вероятности ложных срабатываний

В качестве примера учета внешних воздействий рассмотрим противодействие ИБ СТС [1].

Вероятность ложных срабатываний ИБ изделия рассчитываются на основе анализа пороговых уровней принятия решения. Предполагается, что в интервале времени формирования пороговых уровней принятие решения сигнал, формируемый ИБ изделия, квазистационарен.

##### *Общее описание алгоритма*

Вероятность ложных срабатываний за время поиска  $T_n$  определяется выражением

$$P_{лс} = 1 - \exp\left(-\int_0^{T_n} \lambda(t) dt\right), \quad \lambda(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \omega_{\psi}(t) \cdot \exp\left(-\frac{q^2(t)}{2}\right),$$

где:  $\lambda(t)$  – частота выброса за пороговый уровень;

$q(t)$  – пороговое отношение сигнал-шум;

$\omega_{\psi}$  – круговая частота случайного процесса – сигнала от фона;

$$\omega_{\psi} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} S_{\psi}(\omega) \cdot \omega^2 dt}{2\pi\sigma_{\psi}}}, \quad q_j = \frac{1}{2\pi\sigma_{\omega}} \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} S_{\psi}(\omega) d\omega},$$

$S_{\psi}$  – спектральная плотность мощности на выходе линейной системы «приемный блок – блок обработки сигнала» (на выходе решающего устройства):

$$S_{\psi}(\omega) = |W(j \cdot \omega, j \cdot \omega)|^2 \cdot E_{\psi}(\omega),$$

$\sigma_{\psi}$  – среднеквадратические отклонения сигнала от фона;

$W(j \cdot \omega, j \cdot \omega)$  – пространственно-частотная передаточная функция системы.

$$T_n = \frac{H_0}{V_s} \cdot \left(1 - \frac{H_s}{H_0}\right) - \text{время поиска,}$$

где  $H_0$  – высота начала поиска;

$H_s$  – высота захвата объекта.

### 7.3.2. Модель преобразования сигнала и принятия решения для расчета вероятности правильного обнаружения

Модель обнаружения включает следующие блоки:

**Формирование входного сигнала**, описываемого выражением

$$И(t) = \iint_t K(t) \cdot B(\Omega) d\Omega dt$$

где  $B(\Omega)$  – яркость фона или объекта в телесном угле;

$\Omega$  – апертура приемной системы;

$t$  – время формирования сигнала.

$K(t) = f(x_{\text{пр}}(t), z_{\text{пр}}(t), \text{ВП}, \text{М}, \text{СМ}, r)$  – функция, зависящая от траектории сканирования, взаимного положения изделия и объекта ВП, метеоусловий М, пространственно-временных и энергетических характеристик маскирующих средств СМ, характеристик приемной системы.

**Преобразование входного сигнала в электронном тракте** определяется по формуле

$$И = f(И(t), \Lambda),$$

$\Lambda$  – алгоритм обработки сигнала.

**Блок принятия решения** описывается выражениями:

$$P_{\text{по}} = P(\gamma_1, x_1) = \Phi\left(\frac{U_c}{\sigma_{\text{ш}}}, q\right) \cdot P_q,$$

$$P_{\text{лт}} = P(\gamma_1, x_0) = \Phi\left(\frac{U_{\text{ш}}}{\sigma_{\text{ш}}}, q\right),$$

$$P_{\text{пр}} = P(\gamma_0, x_1) = 1 - P_{\text{по}},$$

где  $P_{\text{по}}$ ,  $P_{\text{лт}}$ ,  $P_{\text{пр}}$  – вероятности правильного обнаружения, ложных тревог и пропуска объекта, соответственно;

$x_0, x_1$  – входная информация, не содержащая сигнала от объекта и включающая полезный сигнал, соответственно;

$\gamma_0, \gamma_1$  – принятие решения об отсутствии и наличии объекта, соответственно;

$\sigma_{\text{ш}}$  – среднеквадратические отклонения сигнала от внутреннего шума;

$U_c / \sigma_{\text{ш}}$ ,  $U_{\text{ш}} / \sigma_{\text{ш}}$  – отношение сигнал/шум при наличии и отсутствии на входе сигнала от объекта, соответственно;

$q = \Pi / \sigma_{\text{ш}}$  – пороговое отношение сигнал/шум;

$\Phi$  – интеграл вероятностей;

$P_q$  – вероятность выполнения дополнительных условий срабатывания (принятия решения о наличии объекта).

### 7.3.3. Оценка помехозащищенности СТС

СТС, имеющий информационный канал с различными датчиками обнаружения объектов, подвержен влиянию разного рода помех: естественных или искусственных помех. Для их учета предлагается математическая модель оценки параметров функционирования информационного канала, работающего в режиме поиска объекта, его обнаружения и захвата [65].

Показатели эффективности выполнения этапа поиска определяются следующим образом. Выражение для вероятности попадания объекта в поле зрения ИБ имеет вид:

$$P_{\text{на}} = 1 - \left( 1 - \frac{N_{\text{м}}}{S_{\text{рз}}} \cdot \Delta S_{\text{на}}(H_1) \right) \cdot \frac{S_{\text{пр}}(H_3)}{\Delta S_{\text{на}}(H_3)},$$

где  $\Delta S_{\text{на}}(H_3) = \frac{\pi \cdot \text{tg}^2 \varepsilon_{\text{на}} \cdot H_3^2}{\cos^2 \alpha}$  – площадь проекции поля зрения на подстилающую поверхность;

$$S_{\text{пр}}(H_3) = \frac{\pi \cdot \text{tg} \alpha}{V_3 \cos^2 \alpha} \cdot \text{tg} \varepsilon^2 (H_0 + H_3)^2 \cdot (H_0 - H_3) - \text{просматриваемая площадь при}$$

сканировании с высоты начала поиска  $H_0$  до высоты захвата  $H_3$  (выражение для  $S_{\text{пр}}(H_3)$  справедливо для вертикального снижения);

$N_{\text{м}}$  – количество объектов в зоне просмотра;

$S_{\text{рз}}$  – площадь района расположения объектов;

$2 \varepsilon_{\text{на}}$  – угловой размер поля зрения;

$\alpha$  – угол отклонения оси сканирования от вертикали;

$V_3$  – скорость движения изделия;

$\varepsilon$  – угловая скорость сканирования.

Вероятность правильного обнаружения маяка определяется вероятностью превышения сигналов порогового уровня и вероятностью выполнения дополнительных условий принятия решения:

$$P_{\text{по}} = \Phi(\mu - q) \cdot P_g,$$

где  $\mu$  – отношение сигнал/шум на входе решающего устройства;

$q$  – пороговое отношение сигнал/шум. При этом

$$\mu = \exp\left(-\frac{\beta \cdot H_3}{\cos \alpha}\right) \cdot \Delta B_M \cdot \cos \alpha \cdot K_3 \cdot \Omega;$$

$$\Omega = \Delta S_M \cdot \cos^2 \alpha \cdot H_3 \quad \text{при } \Delta S_M \leq \Delta \Omega \cdot \frac{H_3}{\cos^2 \alpha};$$

$$\Delta \Omega = \frac{\pi}{4} \cdot \text{tg}^2 \Delta \varepsilon, \quad \text{при } \Delta S_M > \Delta \Omega \cdot \frac{H_3}{\cos^2 \alpha};$$

где  $\beta$  – коэффициент ослабления излучения атмосферой,  
 $\Delta B_M, \Delta S_M$  – среднее приращение яркости и эффективная площадь излучения объекта соответственно;

$\Delta \varepsilon$  – угловой размер элемента разрешения;

$K_3$  – коэффициент, характеризующий чувствительность и представляющий собой отношение сигнал/шум на входе решающего устройства на единичной дальности от объекта при единичной интенсивности входного излучения.

Влияние пассивных помех типа покрытий, экранов учитывается соответствующим уменьшением величин  $\Delta B_M, \Delta S_M$ .

Помехи типа дымов и погодных аэрозолей учитываются при расчете коэффициента пропускания излучения атмосферой  $K_{\text{атм}} = \exp(-\beta \cdot H_3 \cos \alpha)$ . В случае применения указанных средств коэффициент имеет вид:

$$K_{\text{атм}} = \exp\left(-\sum_{N_a} \beta_i \cdot \frac{\Delta H_i}{\cos \alpha}\right),$$

где  $N_a$  – число слоев атмосферы с постоянным коэффициентом ослабления;

$\beta_i$  – коэффициент ослабления  $i$ -го слоя атмосферы толщиной  $H_i$  – (один из коэффициентов  $\beta_k$  – соответствует ослаблению излучения в слое дымового или аэрозольного облака толщиной  $H_k$ ).

Вероятность попадания изделия в симметричный объект равна

$$P_{\Pi} = (1 - P_o) \cdot \left[ 2\Phi\left(\frac{\Delta X_n}{\sigma_{\text{сyx}}}\right) - 1 \right] \cdot \left[ 2\Phi\left(\frac{\Delta Z_n}{\sigma_{\text{сyz}}}\right) - 1 \right],$$

где  $P_o = \Phi\left(\frac{\varepsilon_g}{\sigma} - \frac{\varepsilon_M}{\sigma}\right),$

$\varepsilon_g, \sigma$  – динамическая и флуктуационная ошибки слежения;

$\varepsilon_M$  – апертура дискриминатора;

$\Delta X_n, \Delta Z_n$  – размеры области индикации объекта;

$\sigma_{cyx}, \sigma_{cyz}$  – среднеквадратические отклонения точек наведения по соответствующим осям.

Разного рода помехи учитываются при расчете входящих размеров области индикации  $\Delta X_n, \Delta Z_n$  и флуктуационной ошибки слежения

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \cdot \int (K_p(j\omega))^2 \cdot S_n(\omega) d\omega,$$

где  $K_p(j\omega)$  – передаточная функция разомкнутого следящего контура,

$S_n(\omega)$  – энергетический спектр помехи.

На примере информационного блока СТС видно, что учет противодействия (естественного, искусственного (активного, пассивного)) довольно сложен. Он требует использования математических моделей как собственно функционирования СТС (или ее подсистем или элементов), так и математического описания процессов ослабления яркости и сокращения эффективной площади излучения объекта в условиях противодействия, а также учета естественных помех (дымовые облака, туман и т.п.). В большинстве случаев задача аналитически не решается и требуется проводить математический эксперимент на ЭВМ (детерминированный или статистический). Результатом математического моделирования могут быть:

- частные показатели отдельных элементов или подсистем;
- обобщенный показатель в виде вероятности функционирования системы на отдельных этапах;
- общий показатель, реализуемый в виде закона распределения выходной величины

#### 7.4. Основы радиоэлектронной борьбы

На современном этапе развития информационного конфликта радиоэлектронная борьба (РЭБ) — это вид стратегического (оперативного, боевого) обеспечения, который реализуется в противоборстве воюющих сторон. РЭБ заключается в целенаправленном воздействии электромагнитными излучениями на радиоэлектронные и оптико-электронные средства управления, связи, разведки, навигации и опознавания для разрушения полезной информации или внедрения ложной (дезинформации). РЭБ предполагает также защиту своих радио- и оптико-электронных средств от вредных преднамеренных электромагнитных излучений противника, снижение вероятности поражения высокоточным оружием (ВТО) средств вооружения и военной техники, а также и гражданских объектов, функционирование которых важно для обороны. В РЭБ сферой противоборства служит электромагнитное поле широчайшего диапазона волн от

длинноволнового до ультрафиолетового [68]. В некоторых источниках в РЭБ включается также и противоборство информационных систем и средств, работающих в акустическом поле [7,8]. В сферу РЭБ в настоящее время попадает также информационное противоборство, основанное на использовании специальных видов деструктивного программно-технического воздействия на вычислительные системы и средства противника в информационном конфликте. При изложении содержания и задач РЭБ авторы будут придерживаться терминологии и определений, принятых в отечественной литературе [69-73].

РЭБ – это совокупность взаимосвязанных по цели, задачам, месту и времени мероприятий и действий по выявлению систем и средств управления войсками и оружием противника, их радиоэлектронному подавлению и поражению, а также по радиоэлектронной защите своих систем и средств управления войсками и оружием. На рис. 135 приведен состав РЭБ.

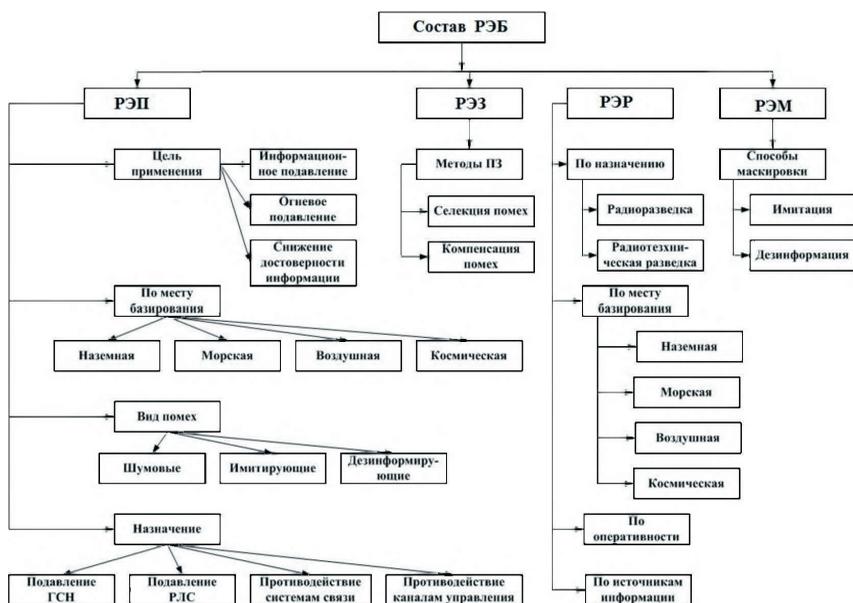


Рис. 135. Состав РЭБ

РЭБ – радиоэлектронная борьба; РЭП – радиоэлектронное противодействие; РЭЗ – радиоэлектронная защита; РЭР – радиоэлектронная разведка; РЭМ – радиоэлектронная маскировка; ГСН – головка самонаведения; РЛС – радиолокационная станция; ПЗ – помехозащита

Выявление систем и средств управления войсками и оружием противника проводится с целью определения данных о назначении, составе и принадлежности систем управления войсками, разведывательно-ударными комплексами и другими видами высокоточного оружия, сил и средств разведки и РЭБ противника. Основные задачи разведки в интересах РЭБ решаются прежде всего с помощью радиоэлектронных средств — средств радиоэлектронных разведок (РЭР). Арсенал этих средств отличается большим разнообразием по назначению, по оперативности, по местам базирования и платформам размещения разведывательных средств, по характеру и особенностям добываемой разведывательной информации. Так, средства радио- и радиотехнической разведки (РРТР), за счет наблюдения за электромагнитными излучениями радиосредств получают информацию о назначении и местоположении этих средств, о параметрах используемых ими сигналов, о содержании информации, циркулирующей в системах и сетях связи и передачи данных. Радиолокационная разведка добывает информацию об объектах (целях) противника, используя РЛС. Радиоэлектронная разведка использует также оптико-электронные средства [68].

Радиоэлектронное подавление (РЭП) заключается в дезорганизации работы радиорелейных, тропосферных и космических средств и систем связи, средств радионавигации, радиолокации путем воздействия на них радиопомехами, применения ложных целей, ловушек, изменения условий распространения радиоволн и радиолокационной наблюдаемости целей.

Оптико-электронное подавление (ОЭП) предусматривает дезорганизацию работы средств управления войсками и оружием ПВО и авиации противника, работающих в оптическом диапазоне волн (инфракрасные, телевизионные, лазерные и оптико-визуальные системы разведки, наблюдения, связи и управления оружием), путем воздействия на них помехами, применения ложных оптических целей, ловушек и аэрозолей. В последние годы значение ОЭП возрастает в связи с повышением роли оптико-электронных средств (ОЭС) в системах управления оружием.

В настоящее время передовые в военно-техническом отношении государства много усилий направляют на разработку и производство перспективных средств РЭБ, работающих на новых физических принципах. Речь идет о так называемом функциональном поражении РЭС, как радиотехнических, так и оптико-электронных, мощным СВЧ-, оптическим (лазерным) и акустическим излучением.

На вооружении имеются средства РЭБ различного назначения, а именно: бортовые и наземные станции активных помех (САП), устройства выброса средств РЭБ, устройства

управления заметностью защищаемых объектов в различных диапазонах электромагнитных волн, аппаратура разведки и предупреждения об облучении и выдачи целеуказания на управление средствами РЭБ, устройства предупреждения о ракетной атаке (УПРА) [6, 7]. В последнее время в целях РЭП начало применяться электромагнитное оружие [34].

На первый взгляд кажется, что система ПРД построена по расточительному принципу – каждому типу наведения СТС соответствует своя система противодействия. В результате работает только один канал, а другие просто присутствуют при этом. На самом деле в разрабатываемых СТС, используются многоканальные и многоспектральные системы самонаведения и противодействовать им приходится комплексно, практически во всех диапазонах. При этом никогда заранее неизвестно, каким участкам спектра излучения и их комбинациям придется противостоять.

Анализ открытых источников [1-7] показывает, что структура СТС включает в свой состав инфракрасные, миллиметровые, акустические ИБ и наведение по спутниковым радионавигационным системам, работающие как в активном так и в пассивном режиме.

Область применения системы противодействия определяется следующими задачами:

- определение типа излучений из состава ИБ;
- определение фона земли и неба;
- формирование помех в разных спектрах излучения.

Перечисленные задачи определяют главную цель противодействия – обеспечение совместно с несколькими модулями РЭП ИБ СТС срыва сопровождения маяка.

Функционирование системы РЭП происходит следующим образом: каналы определения фона земли и неба в разных спектрах излучений и определение акустического фона, выдают информацию о сигналах и шумах, далее реализуется обнаружение сигналов, оценка фона земли и неба.

К системе предъявляются следующие основные технические требования:

- чувствительность и динамический диапазон;
- уровень излучаемой мощности модуля РЭП и пределы регулировки излучаемой мощности;
- углы диаграммы направленности.

## 7.5. Методики защиты СТС

### 7.5.1 Меры защиты в ММ диапазоне длин волн

Рассмотрим подробнее математическую модель активного ММ датчика маяка, основным параметром которого является радиолокационный потенциал, характеризующий уровень сигналов отраженных как от подстилающей поверхности, так и от маяка, который определяется по известной формуле радиолокации:

$$\Pi = \frac{P_{пер}}{P_{пр}} = \frac{(4\pi)^2 D^4}{G_a^2 \lambda^2 S_{эф.Ц}}$$

где  $P_{пер}$  – мощность зондирующего сигнала на выходе антенны;  $P_{пр}$  – мощность отраженного сигнала на входе антенны;  $D$  – расстояние до подстилающей поверхности или маяка  $D = \frac{H_{max}}{\cos\alpha}$ ;  $G_a$  – коэффициент усиления антенны;  $S_{эф.Ц}$  – эффективная площадь отражения подстилающей поверхности или маяка;  $\lambda$  – длина волны зондирующего сигнала  $\lambda = 3 \cdot 10^3$  и  $8 \cdot 10^3$  м.

Для подстилающей поверхности:

$$S_{эф.Ц} = S_n \cdot K_{отп.},$$

где  $S_{\Pi}$  – площадь пятна, вырезаемая диаграммой направленности ММ датчика на расстоянии  $D$ ,  $S_{\Pi} = \frac{4\pi D^2}{G_a}$ .

Коэффициент отражения подстилающей поверхности зависит от вида поверхности, её состояния и изменяется в пределах  $K_{отп} = 0,05 - 0,9$ . Наиболее часто встречающиеся поверхности, содержащие влагу, характеризуются  $K_{отп} = 0,1 - 0,2$ .

Величина потенциала ММ датчика при работе по маяку определяется по той же формуле, но с учетом, что

$$S_{эф.Ц} = S_{Ц} \sigma_{Ц},$$

где  $S_{Ц}$  – площадь маяка, определяемая её геометрическими размерами, обычно  $S_{Ц} \approx 18 \text{ м}^2$ ;  $\sigma_{Ц}$  – удельная эффективная площадь рассеивания поверхности маяка, которая для большинства маяков находится в пределах  $(0,3 - 0,8) \text{ м}^2/\text{м}^2$ .

Результаты ранее приведенных исследований при разработке изделий с аналогичным ММ датчиком показали, что, в первом приближении, для обнаружения маяка с вероятностью не хуже 0,9 необходимо иметь входное отношение сигналов маяк/фон (8 – 9) дБ.

Помехозащищённость ММ датчика определяется уровнем мощности станции помех, при котором происходит его срабатывание или блокировка. И если этот уровень превышает мощность станции помех, то ММ датчик считается помехозащищенным.

Помехозащищённость ММ датчика обеспечивается за счет низкого уровня боковых лепестков, малой ширины основного лепестка диаграммы направленности и широкого диапазона частот, в пределах которого может находиться рабочая частота передатчика.

Мощность станции помех, при которой сигнал помехи блокирует ММ датчик определяется соотношением:

$$P_{ПОМ} = \frac{P_{пр} 16\pi^2 r^2 \Delta f}{G_{ПОМ} G_a \beta \lambda^2 \Delta F},$$

где  $P_{пр}$  – чувствительность приёмника ММ датчика;  $r$  – расстояние до станции помех;  $\Delta f$  – полоса частот, в пределах которой может находиться рабочая частота передатчика;  $G_{ПОМ}$  – коэффициент усиления антенны станции помех прием;  $G_a$  – коэффициент усиления антенны ММ датчика;  $\beta$  – уровень боковых лепестков диаграммы направленности антенны  $\beta = 0,1$ ;  $\lambda$  – рабочая длина волны ММ датчика;  $\Delta F$  – полоса пропускания приемного тракта ММ датчика.

$$P_{пр} = \frac{P_{пер}}{П},$$

где  $П$  – потенциал ММ датчика;  $P_{пер}$  – мощность излучения передатчика.

Следует отметить, что имеющаяся информация относительно постановки маскирующих помех коллективной и индивидуальной защиты, когда помеха представляет собой непрерывное шумовое излучение в полосе чувствительности ММ датчика и воздействует на него через боковые лепестки ДН антенны (коллективная защита с дальностью  $\sim 1$  км) и через основной лепесток ДН антенны (индивидуальная защита).

Мощность сигнала помехи на входе приемника в этом случае может достигать  $10^{-9}$  Вт, то есть приблизиться к пороговой чувствительности ММ датчика, не нанося какого-либо ущерба. ММ датчик воспримет эту помеху как одну из «блестящих» точек поверхности маяка.

### 7.5.2. Меры защиты в ИК диапазоне

Обнаружительная способность ИК датчика на не флуктуирующем фоне на равномерно нагретой до температуры  $T$  земной поверхности и маяка, равномерно нагретого до температуры  $T+\Delta T$ , будет определяться отношением мощности полезного сигнала ( $P_c$ ) к мощности шума ( $P_w$ ).

Яркость излучения нагретой до температуры  $T$  земной поверхности и находящихся на ней различных объектов с учетом поглощения световой радиации в атмосфере определяется выражением:

$$L_b = \frac{1}{\pi} \varepsilon \int_0^{\infty} M_{b\lambda} \tau(\lambda) S(\lambda) d\lambda,$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент излучения поверхности,  $M_{e\lambda}$  – спектральная энергетическая плотность излучения, описываемая законом Планка  $M_{b\lambda} = c_1 \lambda^{-5} \left( \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)^{-1}$ ,  $\tau(\lambda)$  – спектральный коэффициент поглощения атмосферы,  $S(\lambda)$  – спектральная характеристика излучения воспринимаемого фотоприемником (произведение спектральной характеристики пропускания оптического фильтра и спектральной чувствительности фотоприемного слоя), нормированная в максимуме на единицу.

Без учета коэффициента поглощения атмосферы выражение для вычисления яркости излучения, нагретого до температуры  $T$  тела примет вид:

$$L_e = \frac{1}{\pi} \varepsilon \int_0^{\infty} M_{e\lambda} S(\lambda) d\lambda$$

Величина светового потока теплового излучения, воспринимаемая оптической системой определяется по следующей формуле:

$$\Phi = L_e \cdot \tau_{on} \cdot \frac{S_{sp} S}{l^2},$$

где  $\tau_{on}$  – коэффициент потерь в оптической системе,  $S_{sp}$  – площадь входного зрачка оптической системы,  $l$  – длина линии визирования,  $S$  – проекция участка площади земной поверхности на плоскость, нормальную к линии визирования.

Из соотношения подобия имеем:

$$\frac{S}{l^2} = \frac{S_{III}}{f'^2},$$

где  $S_{III}$  – площадь чувствительно площадки фотоприемного устройства,  $f'$  – фокусное расстояние объектива.

Подставляя в формулу для мощности светового потока воспринимаемого оптической системой выражения для яркости нагретого тела, получим формулу для вычисления величины потока приходящего на фотоприемник:

$$\Phi = A \cdot \int_0^{\infty} M_{e\lambda} S(\lambda) d\lambda,$$

$$A = \frac{1}{\pi} \varepsilon \cdot \tau_{on} \cdot \frac{S_{sp} S_{III}}{f'^2},$$

где

Фотоприемное устройство работает таким образом, что не реагирует на постоянную составляющую потока излучения. Переменный сигнал возникает при

переходе мгновенного поля зрения с объекта одной температуры на объект другой температуры и вычисляется по формуле:

$$\Delta\Phi = A \cdot \left( \int_0^{\infty} M_{e\lambda\Pi} S(\lambda) d\lambda - \int_0^{\infty} M_{e\lambda\Phi} S(\lambda) d\lambda \right)$$

Полученное соотношение для вычисления светового потока полностью характеризует величину полезного сигнала.

Численное интегрирование спектральных характеристик позволяет вычислить значение величины сигнала воспринимаемого фотоприемником от маяка, нагретый относительно поверхности земли на величину  $\Delta T$ . При расчете температура фона выбирается от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}$ . Тепловой контраст считается для разности температур между маяком и фоном  $10^{\circ}\text{C}$ . Рассчитанный таким образом энергетический контраст маяка относительно температуры равномерно нагретой подстилающей поверхности на входе фотоприемника соответствует отношению напряжений сигнал/шум на его выходе, что соответствует отношению мощностей полезного сигнала  $P_c$  к мощности шума  $P_{ш}$ .

Обнаружительная способность ИК датчика на фоне с температурными флуктуациями.

В ситуации, когда маяк находится на подстилающей поверхности с температурными флуктуациями, при оценке обнаружительной способности кроме мощности шума фотоприемника необходимо учитывать сигнал от фона (подстилающей поверхности).

Мощность сигнала от фона ( $P_{сф}$ ) в этом случае определяется соотношением:

$$P_{сф} = (S_{опт} \cdot \sigma_{ф} \cdot S_{\Pi}) / D^2,$$

где  $S_{опт}$  – эффективная площадь входного зрачка оптической системы равна  $\approx 10 \text{ см}^2$ ;  $S_{\Pi}$  – площадь пятна, образуемого пересечением полем зрения ИК канала с подстилающей поверхностью:

$$S_{\Pi} \approx (\pi \cdot H \cdot 2\omega / 180 \cdot \cos\alpha)^2 \cdot (\pi \cdot D \cdot 2\omega / 180)^2,$$

где  $H$  – высота над поверхностью фона;  $D$  – наклонная дальность;  $\alpha$  – угол сканирования;  $2\omega$  – угол поля зрения оптической системы.

При не флуктуирующем фоне обнаружение нагретого маяка с температурным контрастом и более можно вести относительно постоянного порога  $P_c$  пор, то на фоне с температурными флуктуациями порог должен быть плавающим в зависимости от уровня флуктуаций.

### 7.5.3. Модуль постановки помех

Модуль постановки дистанционных комбинированных завес предназначен для подавления телевизионных, тепловизионных и полуактивных лазерных головок самонаведения, а также наземных и авиационных систем разведки и прицельных систем путем постановки маскирующего локального аэрозольного образования диаметром 60...100 м.

Для решения указанных задач в состав модуля должны входить средства дистанционной постановки завес.

Для постановки дистанционных завес на траектории СТС могут быть использованы средства помех на основе носителей с головными частями, снаряженными аэрозольными и пиротехническими элементами. В табл. 46. Приведены характеристики гипотетического средства помех.

Таблица 46. Характеристики гипотетического средства помех

Наименование характеристик	Средство помех
Дальность постановки завесы, м	500...6000
Высота постановки завесы, м	50...1000
Размер (диаметр) завесы, м	-
Время постановки завесы, с	5
Время существования завесы в диапазонах длин волн, с:	
0,4...0,8 мкм	30
3...5 мкм	30
8...14 мкм	
— Сила излучения в диапазонах длин волн, кВт/ср:	
— 0,4...1,2 мкм	-
— 3...5 мкм	8,8
— 8...14 мкм	3,7

### 7.5.4. Обобщенная оценка эффективности РЭП

Для оценки промаха СТС  $h$  вводят двумерную нормальную плотность вероятности промаха в декартовых координатах ОХУ в картинной плоскости, нормальной к кинематической траектории наведения (рис. 136):

$$p(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left\{-\left[\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y - m_y)^2}{2\sigma_y^2}\right]\right\},$$

где  $m_x, m_y$ , – математические ожидания компонент промаха  $x, y$ , а  $\sigma_x^2, \sigma_y^2$  – соответственно дисперсии.

Условная вероятность успешного наведения оценивается модулем текущего промаха:

$$h = \sqrt{(\Delta x + m_x)^2 + (\Delta y + m_y)^2} = \sqrt{h_x^2 + h_y^2},$$

где  $\Delta x = h_x - m_x, \Delta y = h_y - m_y$  – флуктуации промаха около математического ожидания ( $m_x, m_y$ ).

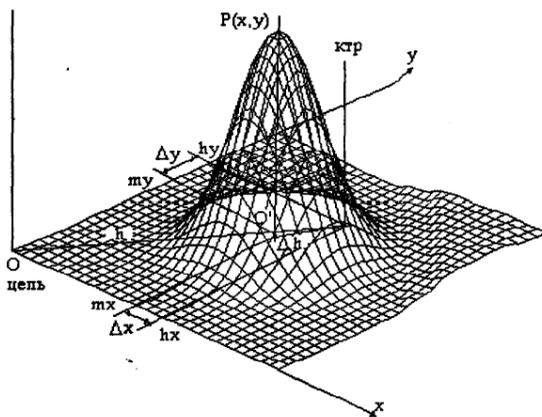


Рис. 136. График плотности вероятности

Вводится условная вероятность наведения для текущей точки попадания  $d$  средства по маяку

$$P_H = P_H(h, R_H) = \exp\left(-\frac{h^2}{2R_H^2}\right) = P(h \leq R_H),$$

где  $R_H$  – эффективный радиус успешного наведения, когда  $h < R_H$ .

После преобразований получим двумерную условную вероятность наведения:

$$P_H(\Delta x, \Delta y; R_H) = \exp \left\{ -\frac{1}{2R_H^2} [(m_x + \Delta x)^2 + (m_y + \Delta y)^2] \right\},$$

Плотность вероятностей компонент промаха  $\Delta x, \Delta y$  оценивается по формуле

$$p(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp \left\{ -\left[ \frac{\Delta x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{\Delta y^2}{2\sigma_y^2} \right] \right\},$$

обычно вводят условную вероятность наведения, усредненную по всем значениям промаха:

$$P_{HCP} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_H(\Delta x, \Delta y; R_H) p(\Delta x, \Delta y) dx dy,$$

При допущениях

$$m_x = m_y = m_h; \sigma_x = \sigma_y = \sigma_h,$$

после вычислений, получим следующий результат

$$P_{\text{пор}} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_H(\Delta x, \Delta y; R_H = R_{\text{пор}}) p(\Delta x, \Delta y) dx dy = \exp \left( -\frac{m_h^2}{R_{\text{пор}}^2} \right) \left[ 1 + \left( \frac{\sigma_h}{R_{\text{пор}}} \right)^2 \right]^{-1}.$$

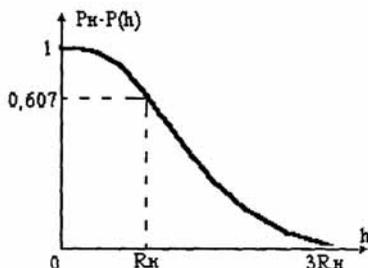


Рис. 137. Оценка качества попадания

Эту величину принимают за оценку качества попадания (рис. 137). Если

$P_{\text{пор}} < P_{\text{порог}}$ , принимается решение на повторное попадание.

Эффективность РЭП оценивают по величине коэффициента

$$\mu_{\text{пор}} = \frac{(P_{\text{пор}})_{\text{без РЭП}}}{(P_{\text{пор}})_{\text{с РЭП}}}.$$

Промах по маяку оценивается по величинам  $m_x, \sigma_x$  и вероятность попадания СТС в маяк определяется следующим образом:

$$P_{\text{попад}} = \exp \left( -\frac{m_h^2}{R_{\text{пор}}^2} \right) \left[ 1 + \left( \frac{\sigma_h}{R_{\text{пор}}} \right)^2 \right]^{-1}.$$

### 7.5.5. Меры защиты

Использование СПС значительно затрудняется в условиях воздействия организованных помех различного типа и интенсивности. При этом СПС должен решать те же задачи, что и в условиях отсутствия помех: обнаружение маяков, их разрешение, оценивание координат, формирование команд управления на исполнительные механизмы.

Для оптимального решения задачи наведения в условиях сложной фоно–целевой обстановки применяется *комплексирование датчиков различной физической природы* систем самонаведения, работающих в едином информационно-управляющем процессе наведения СПС.

Во многих практических задачах имеется возможность одновременно автоматически измерять координаты объектов или параметры их движения с помощью различных устройств, в том числе действующих на различных физических принципах.

Отметим, что комплексирование данных при наличии  $M$  датчиков-измерителей различной физической природы позволяет реализовать  $2^M - 1$  вариантов объединения информации, что в ряде случаев позволяет реализовать систему со структурной и информационной избыточностью.

При комплексировании данных для интеллектуальных систем самонаведения с большой дальностью действия на разных этапах для решения задачи используются результаты работы различных информационных подсистем.

Так, на этапе подготовки данных для наведения комплексированию подлежат параметры местоположения маяка.

На этапе наведения комплексированию, например, подлежат измерения инерциальной системы и результаты определения местоположения СПС по данным спутниковой системы навигации.

Вариант работы системы комплексирования данных на этапе самонаведения может быть представлен следующим алгоритмом.

При самонаведении средств, осуществляющих реализацию метода пропорциональной навигации, необходимо с помощью координатора измерять угловые координаты маяка[69]. Их можно измерить тепловизионным или телевизионным пеленгатором. Каждый из измерителей работает с ошибками. Объединяя измерители в единую систему, получают выигрыш в точности и надежности измерений.

При объединении измерителей в единую систему традиционно исходят из следующих двух основных принципов – задающее воздействие, поступающее на каждый из измерителей, является одним и тем же (система с одинаковыми задающими

воздействиями), закодированным в параметрах различных физических полей, поступающих на входы измерители [69]. При комплексировании в случае одинаковых задающих воздействиях используют компенсационный и фильтровой способы объединения информации измерителей, действующих на различных физических принципах.

Физические причины и условия получения выигрыша фильтровой и компенсационной систем одинаковы, и заключаются в выборе таких форм амплитудно – частотных характеристик фильтров, которые эффективно подавляют помеховые составляющие в различных спектральных диапазонах тем или иным способом, а с другой стороны – пропускают составляющие задающего воздействия. В комплексном измерителе второго вида, называемом также измерителем с неполной информацией, измеряют не один, а разные, но функционально связанные параметры.

Вариант комбинирования результатов обработки информации в комбинированных активно-пассивных (радиолокационно-оптических) следающих координаторах систем самонаведения представлен на рис. 138.

Комбинированная следающая система, показанная на рис. 138, содержит объединенные механически на одном основании оптико-электронный пеленгатор (ОЭП) и локационный пеленгатор (РЛП), два устройства формирования координат наведения (УФКН) оси слежения, два блока оценки дисперсии (БОД) измеренного пеленга, управляющую часть и исполнительные устройства (УЧ) механического поворота оси слежения пеленгаторов, блок управления (БУ) и коммутатор (Комм).

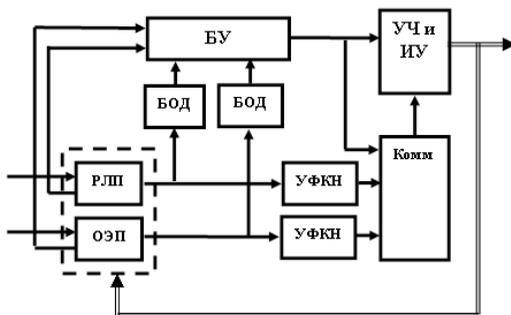


Рис. 138. Структурная схема комбинированной следающей системы

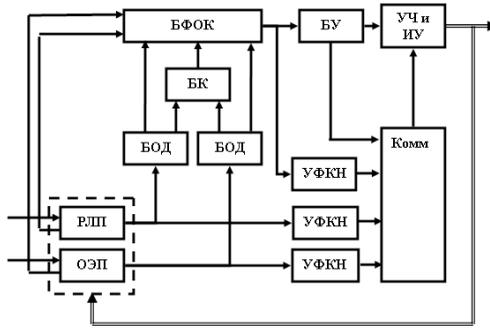


Рис. 139. Структурная схема комплексированной следящей системы

В блоках оценки дисперсии (БОД) по зависимостям  $\bar{\beta}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{\beta}_i$ , и  $\bar{\sigma}_\beta^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{\beta}_i - \bar{\beta})^2$ , определяются оценки математического ожидания и дисперсии сглаженных величин угловой координаты  $\beta$  в соответствующих каналах.

Повышение точности определения координат маяка в условиях воздействия нестационарных интенсивных помех в различных диапазонах излучения достигается за счет текущего формирования оценок дисперсий измерений координат оптико-электронного и локационного пеленгаторов, их сравнения и своевременного переключения выхода следящей системы на тот пеленгатор, в диапазоне работы которого помеха отсутствует или оказывает меньшее влияние на точность измерения координат.

Развитием схемы приведенной на рис. 138 служит комплексированная следящая система [70], структурная схема которой приведена на рис.139.

Формирование более точной оценки угловой координаты реализовано в совместной работе блоков комплексирования (БК) и формирования обобщенной координаты (БФОР) и УФКН в соответствии с известным алгоритмом взвешенного усреднения [73].

При наличии выборок оцениваемой координаты  $i = 1, 2 \dots K$  от РЛП и  $j = 1, 2 \dots L$  ОЭП можно показать, что оптимальная по критерию максимального правдоподобия оценка координаты определяется зависимостью

$$\bar{\beta}_{opt} = \frac{\bar{\sigma}_{\beta_j}^2 \sum_{i=1}^K \bar{\beta}_i + \bar{\sigma}_{\beta_i}^2 \sum_{j=1}^L \bar{\beta}_j}{L \bar{\sigma}_{\beta_i}^2 + K \bar{\sigma}_{\beta_j}^2},$$

которая при  $K = L = 1$  принимает вид

$$\bar{\beta}_{opt} = \frac{\bar{\sigma}_{\beta_i}^2 \bar{\beta}_{ji}}{\bar{\sigma}_{\beta_i}^2 + \bar{\sigma}_{\beta_j}^2} + \frac{\bar{\sigma}_{\beta_j}^2 \bar{\beta}_i}{\bar{\sigma}_{\beta_i}^2 + \bar{\sigma}_{\beta_j}^2},$$

При малой выборке результатов измерений вычисление дисперсии можно осуществлять по зависимостям, позволяющим корректировать значение математического ожидания и дисперсии [71]:

$$\bar{\beta}_{n+1} = \bar{\beta}_n + \frac{1}{n+1}(\beta_{n+1} - \bar{\beta}_n)$$

$$\bar{\sigma}_{\beta_{n+1}}^2 = \bar{\sigma}_{\beta_n}^2 + \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^n ((\bar{\beta}_{n+1} - \bar{\beta}_n)^2 - \bar{\sigma}_{\beta_n}^2).$$

Эффективность комплексированной системы самонаведения можно оценить приростом вероятности попадания в маяк за счет увеличения точности отслеживаемых координат.

На рис. 140 показаны изменение СКО определения угловой координат радиолокационным, оптическим и комбинированным пеленгатором, соответственно, в процессе слежения за маяком.

Увеличение дисперсии ошибки определения угловой координат маяка радиолокационным пеленгатором на конечном участке самонаведения объясняется наличием углового шума, статистические характеристики которого подробно изложены в работе [72].

Наиболее значимым критерием эффективности системы самонаведения является вероятность попадания в маяк, которая определяется зависимостью

$$P = \frac{1}{1 + (\sigma/R_{эфф})^2},$$

где  $R_{эфф}$  – эффективный радиус попадания.

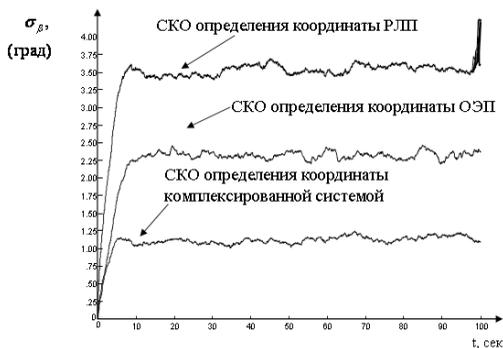


Рис. 140. Среднеквадратические ошибки оценки координат различными датчиками

Следовательно, увеличение СКО определения координат маяка, достигаемое за счет воздействия на систему наведения активных помех или изменения условий распространения радиоволн с помощью аэрозольных образований, приводит к снижению вероятности попадания в маяк.

## 7.6. Оценка СТС различной структуры

В работе [7] рассмотрен пример оценки СТС с комбинированным информационным блоком и комбинированной системой управления. В данном разделе рассмотрен этот пример с добавлением блока ПРД.

В табл. 47-51 записываются различные сочетания блоков для построения СТС и соответственно алгоритмы управления системой. При этом следует иметь в виду, что для парашютных систем участок спуска СТС после выброса из самолета или другого какого-либо устройства состоит, как правило, из трех участков наведения: дальнего, среднего, ближнего. На дальнем участке можно использовать алгоритм  $H_2$  или  $H_3$ , на среднем и ближнем – только  $H_1$  (см. табл. 47-51).

Таблица 47. Методы наведения

Вариант	Метод наведения (МН)
$H_1$	Пропорциональное наведение
$H_2$	Прямое наведение
$H_3$	Метод погони
$H_4$	Баллистический спуск
$H_5$	Метод параллельного сближения

Таблица 48. Информационный блок

Вариант	Информационный блок (ИБ)
$I_1$	ИК-канал (2-х каналный)
$I_2$	ММ-канал (миллиметровый)
$I_3$	$I_1$ + АК-канал (акустический)
$I_4$	$I_1$ + УФ-канал (ультрафиолетовый)
$I_5$	Пространственное видение местности
$I_6$	АК-канал + УФ-канал

И <sub>5</sub>	Пространственное видение местности
И <sub>6</sub>	АК-канал + УФ-канал

Таблица 49. **Исполнительные органы**

Вариант	Исполнительные органы (ИО)
О <sub>1</sub>	Аэродинамика
О <sub>2</sub>	ИДК (импульсные двигатели коррекции)
О <sub>3</sub>	Одноразовый импульс

Таблица 50. **Вид фона**

Вариант	Вид фона (Ф)
Ф <sub>1</sub>	Пространственное видение местности
Ф <sub>2</sub>	Плоская картина
Ф <sub>3</sub>	Математическое описание отдельных сюжетов местности

Таблица 51. **Дополнительные источники местности**

Вариант	Дополнительные источники местности (ДИО)
Д <sub>1</sub>	Маяк автономный (сбрасываемый)
Д <sub>2</sub>	Естественный (пожар, льдина, вода, лес)
Д <sub>3</sub>	Математическая привязка в памяти бортового компьютера
Д <sub>4</sub>	Маяк на местности (костер, фара и т.п.)
Д <sub>5</sub>	Телеканал

Таблица 52. **ПРД**

Вариант	Вид противодействия
П <sub>1</sub>	Помехи пассивные
П <sub>2</sub>	Помехи активные
П <sub>3</sub>	Отсутствие помех
П <sub>4</sub>	Аэрозольная завеса
П <sub>5</sub>	Звуковая помеха
П <sub>6</sub>	Противодействие в УФ диапазоне

В табл. 52 приведены возможные виды ПРД. Компонуя структуру СТС согласно приведенным таблицам и увязывая ее с таблицей задач (см. табл. 53) можно выбрать наиболее рациональный вариант построения системы. Применяя спектральный метод сравнения систем, проводим ранжирование различных вариантов (сравнительную оценку рассматриваемых вариантов) с точки зрения выполнения поставленной задачи с наибольшей эффективностью.

Таблица 53. **Задачи, решаемые СТС**

Вариант	Задачи (З)
З <sub>1</sub>	Осмотр местности
З <sub>2</sub>	Доставка грузов (медикаментов и т.п.)
З <sub>3</sub>	Фотосъемка
З <sub>4</sub>	Экологический мониторинг местности
З <sub>5</sub>	Разведка
З <sub>6</sub>	разброс датчиков на местности
З <sub>7</sub>	Ретрансляционный маяк для других объектов

Достоинствами комбинированных алгоритмов являются: точность, помехозащищенность, эффективность, низкая уязвимость. В количественном отношении степень преимущества определяется возможностями отдельных каналов блоков СТС. Оценить количество такие системы можно только с помощью статистического моделирования, но в настоящее время информация по различным каналам по степени проработанности не соответствует друг другу. Поэтому на данном этапе можно принять качественную оценку таких систем. В основе такой оценки лежит экспертная оценка каждого блока и канала, а затем – сравнительное ранжирование с помощью спектрального метода оценки сложных систем.

**Пример 7.1.** В табл. 54 приведены различные варианты структур комбинированной СТС.

Таблица 54. **Варианты структур СТС**

Вариант СТС	Тип СТС	МН	ИБ	ИО	Ф	З	ДИО	ПРД
1	Стандартный	$H_4+H_1$	$I_1$	$O_1$	$\Phi_2$	$З_1, З_2, З_4$	$D_2$	$P_3$
2	Комбинация ИБ	$H_1$	$I_1+I_2$	$O_1$	$\Phi_2$	$З_1, З_2, З_4$	$D_2$	$P_2$
3	Комбинация ИБ+ИО	$H_1$	$I_3$	$O_1+O_3$	$\Phi_2$	$З_1, З_2, З_4$	$D_2+D_3$	$P_4$
4	Комбинация ИБ+ИО+ДИО	$H_1$	$I_4$	$O_1+O_3$	$\Phi_1$	$З_1, З_2, З_4$	$D_2+D_3$	$P_1$
5	Комбинация ИБ+МН+ИО+ДИО	$H_3+H_1$	$I_6$	$O_1$	$\Phi_1$	$З_1, З_2, З_4$	$D_2+D_3$	$P_2$

Таблица 55. Исходные данные (в относительных единицах)

Вариант СТС	Масса	Энергия	Точность	Стоимость	Эффективность	Надежность	Помехозащищенность
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1,5	1,5	1	2	1,3	1,2	0,8
3	1,05	1,01	1,2	1,05	1,3	1,2	0,7
4	1,1	1,1	1,3	1,1	1,4	1,3	0,9
5	0,8	0,8	1,2	0,8	1,3	1,2	0,75
Критерий	min	min	max	min	max	max	

В табл. 55 приведены результаты экспертной оценки перечисленных в табл. 54 вариантов, причем вариант 1 в табл.55 принят за стандартный с условными величинами, равными 1.

Таблица 56. Результаты расчетов

Результаты ранжирования вариантов СТС	Вариант СТС	1	2	3	4	5		
	Значение $K_{\text{ранж}}[7]$	<b>0,81</b>	<b>0,72</b>	<b>0,89</b>	<b>0,91</b>	<b>1,00</b>		
	Значение $K_{\text{ранж}}$ с учетом ПРД	<b>0,86</b>	<b>0,76</b>	<b>0,89</b>	<b>0,94</b>	<b>1,0</b>		
Вклады параметров в общую эффективность	Параметр СТС	1	2	3	4	5	6	7
	Вклад параметра[7]	<b>0,85</b>	<b>0,86</b>	<b>0,97</b>	<b>0,83</b>	<b>0,99</b>	<b>1,00</b>	
	Вклад параметра с учетом ПРД	<b>0,85</b>	<b>0,85</b>	<b>0,97</b>	<b>0,83</b>	<b>0,99</b>	<b>1,00</b>	<b>0,91</b>

В табл.56 приведены результаты ранжирования СТС и вклад каждого параметра в конечную эффективность рассматриваемых СТС. Анализ результатов расчетов позволяет выбрать рациональный вариант или оценить влияние каждого параметра табл. 55 на конечную эффективность. Таким образом, из анализа результатов расчетов следует, что наилучшим вариантом является СТС - 5, затем последовательно 4-я, 3-я и т.д. системы. Отличия между величинами незначительны - это говорит о том, что практически все рассмотренные СТС равновероятны по конечному результату (рис. 141, 142). Но следует отметить важный фактор – введение блока ПРД повысило величину  $K_{\text{ранж}}$  для каждого варианта структуры СТС, при этом вклад параметров остался таким же. Т.е. введение блока ПРД повышает надежность СТС при любом виде противодействия.

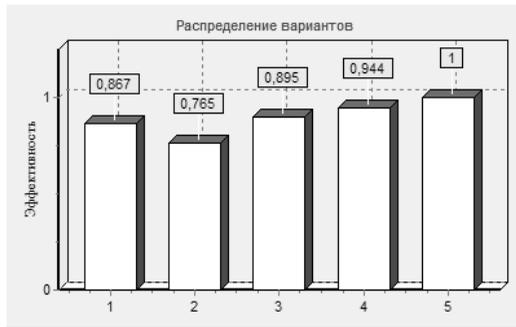


Рис. 141. Результаты ранжирования

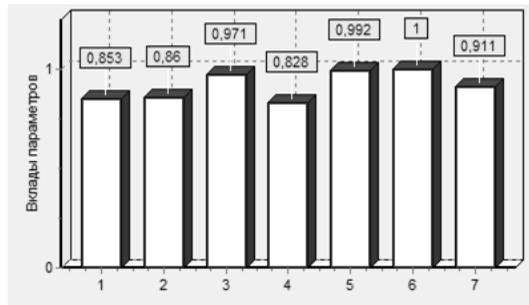


Рис. 142. Вклад каждого параметра в общую эффективность

Наиболее значительными по вкладу оказались параметры: надежность, эффективность и стоимость; масса и энергия - равнопрочны, и точность - оказалась по этим данным практически на таком же уровне. Если бы какое-то значение параметра оказалось меньше 0,5, то им можно было бы пренебречь. Чем больше вариантов и параметров задействовано при оценке, тем более широк диапазон разбросов выходных величин и тем легче отбрасывать наихудшие варианты.

\*\*\*

Приведенный в главе материал позволяет учесть фактор противодействия при исследовании и проектировании СТС различной структуры. Конечно, материал не полностью охватывает виды противодействия и их влияние на работоспособность СТС, но позволяет количественно фактор противодействия оценить в первом приближении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Системный анализ* и технический облик средств точной доставки грузов / Г.В. Абраменко, А.Ю. Краснощеков, Е.Б. Казанцева, М.Г. Фабричный; под ред. Ю.И. Краснощекова. М.: ЦНИИЭТКПК, 1995.
2. *Абраменко Г.В., Васильков Д.В., Воронько О.В.* Проектирование сложных наукоемких технических систем / под ред. А.И. Григорьева. М.: РФФИ, 2006.
3. *Абраменко Г.В., Васильков Д.В., Воронько О.В., Григорьев А.И.* Особенности проектирования сложных наукоемких технических систем. М.: ФГУП ГИКП «РИТМ», 2009.
4. *Абраменко Г.В., Васильков Д.В., Григорьев А.И.* Применение системного анализа при исследовании сложных технических систем. М.: ФГУП «ЦНИИХМ», 2010.
5. *Методы системного анализа* и примеры применения: учеб. пособие/Г.В. Абраменко, Д.В. Васильков, А.И. Григорьев, С.С. Негодяев. – М.: МФТИ, 2011.
6. *Абраменко Г.В., Шорин А.А.* Применение системного анализа в технике и экономике. - М.:ЦЭИ Химмаш, 2001.
7. *Абраменко Г.В., Краснощеков А.Ю., Краснощеков М.А.* Системный анализ и технический облик информационных блоков сложных технических систем. - М.:ООО «Оргсервис-2000», 2013.
8. *Абраменко Г.В., Краснощеков А.Ю., Краснощеков М.А.* Самонаводящаяся парашютная система – от облика до испытаний. – М.:ООО «Оргсервис-2000», 2014.
9. *Абраменко Г.В., Васильков Д.В., Григорьев А.И.* Применение системного анализа при проектировании подводных робототехнических систем. – М: ФГУП «ЦНИИХМ»,2014.
10. *Абраменко Г.В., Власов К.В., Краснощеков М.А.* Принципы построения системы управления СПС// М.: ВИНТИ РАН, №49-В2015.
11. *Абраменко Г.В., Краев С.В., Лифиц А.Л.* Конструкция самонаводящейся парашютной системы для доставки грузов.// БИНТИ-1,1993, № 1.
12. *Создание высокоточных систем* доставки грузов в труднодоступные районы//БИНТИ-1, 1993, №3.
13. *Абраменко Г.В., Краснощеков А.Ю.* Создание системы центров высокоточных систем доставки грузов в труднодоступные районы//Конверсия в машиностроении,1994,№1-2.
14. *Абраменко Г.В., Краснощеков А.Ю.* Теоретическое обоснование облика системы высокоточной доставки грузов в труднодоступные районы.// Техника. Технология. Управление, 1994, № 1-2.
15. *Абраменко Г.В.* Создание высокоточных систем доставки грузов в труднодоступные районы// БИНТИ, 1993, № 3.

16. *Абраменко Г.В., Васильков Д.В.* Применение самонаводящейся парапланной системы для мониторинга местности и доставки грузов в труднодоступные районы// Конверсия в машиностроении, 2006, № 2.
17. *Абраменко Г.В., Митрохина Н.В.* Процедура оценки конкурсных заявок на основе применения спектрального метода ранжирования вариантов // Конверсия в машиностроении, 2004, № 1.
18. *Абраменко Г.В.* Алгоритм обработки измерительной информации, получаемой от датчика маяка СПС//Техника. Технология. Управление, 1994, №5-6.
19. *Абраменко Г.В., Васильков Д.В.* Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов.// Боеприпасы, 2009, № 3.
20. *Абраменко Г.В., Васильков Д.В., Воронько О.В.* Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов при решении народнохозяйственных задач.// Конверсия в машиностроении, 2006, № 4.
21. *Абраменко Г.В., Краснощеков А.Ю., Краев С.В., Лифиц А.Л.* Парашютная система для доставки грузов. Патент РФ № 2039680 от 20.07.95 г.
22. *Абраменко Г.В., Краснощеков А.Ю., Фокин С.С.* Управляемая парашютная система. Патент РФ № 2111898 от 27.05.1998 г.
23. *Абраменко Г.В., Воронько О.В., Васильков Д.В., Григорьев А.И.* Управляемая парапланная система. Патент РФ № 2378160 от 10.01.2010 г.
24. *Абраменко Г.В.* Оценка эффективности мероприятий в области обеспечения химической безопасности (Эффект): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614979 от 8 июня 2010 г.
25. *Абраменко Г.В., Краснощеков М.А.* Спектральный метод ранжирования альтернативных вариантов сложных систем (Ранг): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612092 от 25.12. 2014.
26. *Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981.
27. *Клиланд Д., Кинг В.* Системный анализ и целевое управление. М.: Советское радио, 1974.
28. *Садовский В.Н.* Основания общей теории систем. М.: Наука, 1974.
29. *Калман Р., Фалб П., Арбиб М.* Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971.
30. *Хомяков Д.М., Хомяков П.М.* Основы системного анализа. М.: Наука, 1996.
31. *Жилин Д.М.* Теория систем. М.: Наука, 2004.
32. *Ильичев А.В., Волков В.Д., Груцанский В.А.* Эффективность проектируемых элементов сложных систем: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1982.

33. *Ильичев А.В., Грущанский В.А.* Эффективность адаптивных систем. М.: Машиностроение, 1987.
34. *Гермейер Ю.Б.* Введение в теорию исследования операций. М.: Наука, 1971.
35. *Вентцель Е.С.* Исследование операций. М.: Советское радио, 1972.
36. *Васильев Ю.Л., Дмитриев А.Н.* Спектральный подход к сравнению объектов, охарактеризованных набором признаков // Докл. АН СССР. 1972. Т. 206. № 6. С.1309.
37. *Абраменко Г.В., Красикова Л.Г., Шорин А.А.* Расшифровка и анализ полигонных данных испытаний акустической системы//Боеприпасы, 2000, №3.
38. *Абраменко Г.В., Другов Ю.Я., Фабричный М.Г.* Выбор параметров акустической системы информационного блока сложной технической системы//Боеприпасы, 2000, №3.
39. *Абраменко Г.В., Другов Ю.Я., Фабричный М.Г.* Принципы комплексирования акустической системы в информационном блоке сложных технических систем//Конверсия в машиностроении, 2000, №4.
40. *Банди Б.* Методы оптимизации. Вводный курс. М.: Радио и связь, 1988.
41. *Моисеев Н.Н.* Численные методы в теории оптимальных систем. М.: Наука, 1978.
42. *Моисеев Н.Н., Иванов Ю.Н., Столярова Е.М.* Методы оптимизации. М.: Наука, 1978.
43. *Понтрягин Л.С.* и др. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1969.
44. *Болтянский В.Г.* Математические методы оптимального управления. М.: Наука, 1969.
45. *Иванов В.* Математические основы теории оптимального и логического управления. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011.
46. *Тарасенко Ф.П.* Прикладной системный анализ. Томск: Наука, 2004.
47. *Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А.* Системный анализ в управлении. М.: Финансы и статистика, 2002.
48. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. - М.: Наука, 1977.
49. *Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций/Под ред. А.А.Свешникова.* М.: Наука, 1965.
50. *Программное определение вида функций распределения случайной величины/ Госстрой СССР, - М.: БИЛ, 1975. Вып. IV.*
51. *Вентцель Е.С.* Исследование операций: Задачи, принципы, методология. – М.: Наука, 1988.
52. *Березин И.И., Жидков Н.П.* Методы вычислений. – М.: Физматгиздат, 1960.
53. *Гутер Р.С., Резниковский П.Т.* Программирование и вычислительная техника. – Вып. 2. – М.: Наука, 1971.

54. Семенов С.С. Оценка качества и технического уровня сложных систем. Практика применения метода экспертных оценок. – М.: ЛЕНАНД, 2015.
55. Абраменко Г.В., Васильков Д.В., Воронько О.В. Практический метод создания баз знаний//Конверсия в машиностроении, 2006. №5.
56. Волостнов Б.И., Поляков В.В., Путиков А.В. Основные положения по созданию федеральной системы кодификации научно-технических знаний//М.: «Поиск», 2002, №10.
57. Абраменко Г.В., Шорин А.А. Принципы построения отраслевой информационной технологии//Конверсия в машиностроении, 2002, №4.
58. Вдовин В.М., Суркова Л.Е., Валентинов В.А. Теория систем и системный анализ: Учебник для бакалавров. - М.: Издательство – торговая корпорация «Дашков и К<sup>3</sup>», 2013.
59. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++. – М.: «издательство БИНОМ»; СПб.: «Невский диалект», 1998.
60. Кижасев С.А., Бульхин А.К., Ключников В.Ф. Практические примеры реализации методов декомпозиции и децентрализации в сложных технических системах// «Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика», 2003, № 3.
61. Кузовков Н.Т. и др. Непрерывные и дискретные системы управления и методы идентификации/Н.Т. Кузовков, С.В. Карабанов, О.С. Салычев. – М.: Машиностроение, 1978.
62. Dennis S.C.R., Poots G. The Solution of Linear Differential Equations. – Proc/ Cambridge Philos./Soc., 1955, July, № 3, vol. 51, h. 422-432.
63. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений.-М.: Физматгиз, 1963.
64. Михеев В. Российские средства РЭБ нейтрализуют любое западное оружие - [www.ruposters.ru/archives/11546](http://www.ruposters.ru/archives/11546).
65. Семенов С.С., Харчев В.Н., Иоффин А.И. Оценка технического уровня образцов вооружения и военной техники. – М.: Радио и связь, 2004.
66. Семенов С.С., Щербинин В.В. Оценка технического уровня систем наведения управляемых авиационных бомб. – М.: Машиностроение, 2015.
67. Системная оценка внешних воздействий на объекты и сложные технические системы/Г.В. Абраменко, Д.В. Васильков, А.И. Григорьев, А.А. Новиков. – М.: ФГУП «ЦНИИХМ», 2012.
68. Максимов М.В., Горгонов Г.И. Радиоэлектронные системы самонаведения. – М.: Радио и связь, 1982.
69. Бобнев М.П., Кривицкий Б.Х., Ярлыков М.С. Комплексные системы радиоавтоматики. – М.: Советское радио, 1968.

70. *Анцев Г.В., Турнецкий Л.С., Борисов Е.Г.* и др. Следящая система, патент РФ на полезную модель № 77690, МПК G01S 13/66, заявл. 03.09.2007г., опубл. 27.10.2008.
71. *Абчук В.А., Матвейчук Ф.А., Томашевский Л.П.* Справочник по исследованию операций. – М.: Воениздат, 1979.
72. *Гузик В.Ф., Кидалов В.И., Самойленко А.П.* Статическая диагностика неравновесных объектов. – СПб.: Судостроение, 2009.
73. *Островитянинов Р.В., Басалов Ф.А.* Статическая теория радиолокации протяженных целей. – М.: Радио и связь, 1982.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

### Расчет параметров закона распределения случайных величин

Для понимания дальнейшего материала напомним некоторые основные понятия из теории вероятностей [51].

Случайная величина называется дискретной, если ее частные (возможные) значения можно пронумеровать. *Рядом распределения* называется совокупность всех возможных значений  $x_i$  и соответствующих им вероятностей  $p_i = P(X = x_i)$ .

*Функцией распределения* (интегральным законом распределения) случайной величины  $X$  называется функция  $F(x)$ , равная вероятности  $P(X < x)$  того, что случайная величина будет меньше произвольно выбранного значения  $x$ . Функция  $F(x)$  вычисляется по формуле

$$F(x) = \sum_{x_i < x} p_i,$$

где суммирование ведется по всем значениям  $i$ , для которых  $x_i < x$ .

*Непрерывной случайной величиной* называется такая величина, которая может принимать любые числовые значения в заданном интервале и для которой при любом  $x$  из этого интервала существует предел

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x < X < x + \Delta x)}{\Delta x},$$

именуемый плотностью вероятности.

Функция распределения (интегральный закон распределения)  $F(x) = P(X < x)$ , где  $x$  – произвольное действительное число, дает вероятность того, что случайная величина  $X$  окажется меньше  $x$ .

Функция распределения  $F(x)$  имеет следующие основные свойства:

- 1)  $P(a \leq X < b) = F(b) - F(a)$ ;
- 2)  $F(x_1) \leq F(x_2)$ , если  $x_1 < x_2$ ;
- 3)  $\lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = 1$ ;
- 4)  $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$

Плотность вероятности (дифференциальный закон распределения)  $f(x)$  обладает следующими основными свойствами:

- 1)  $f(x) \geq 0$ ;
- 2)  $f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$ ;
- 3)  $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$ ;
- 4)  $P(a \leq X < b) = \int_a^b f(x) dx$ .

Для дискретной случайной величины плотность вероятности  $f(x)$  имеет вид

$$f(x) = \sum_{k=1}^n \delta(x - x_k),$$

где  $x_k$  – возможные значения случайной величины;

$p_k$  – соответствующие им вероятности,

$p_k = P(X = x_k)$ ,

$\delta(x)$  – обозначение дельта-функции, то есть такой функции, для которой справедливо

$$\delta(x) = \begin{cases} \infty & \text{при } x = 0; \\ 0 & \text{при } x \neq 0, \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) \delta(y-x) = \varphi(y),$$

где  $\varphi(x)$  – любая непрерывная в точке  $x = y$  функция.

В работе [7] рассмотрены вопросы применения дельта-функции к решению различных технических задач.

Пусть в результате проведения эксперимента (технического, экономического, экологического и т.п.) получена выборка случайных величин в виде матрицы  $A$ . Необходимо провести проверку соответствия экспериментальных данных заданным законам распределения по критериям согласия Пирсона или Колмогорова [49].

Критерии согласия позволяют оценить вероятность того, что полученная выборка не противоречит сделанному предположению о виде закона распределения рассматриваемой случайной величины.

Вначале с помощью известных соотношений из теории вероятности определяются среднеквадратическое отклонение СКО, математическое ожидание  $m$ , размах варьирования  $R$ , центральные моменты  $M_2, M_3, M_4$ , показатели асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $\epsilon$ , СКО для асимметрии и эксцесса.

Затем осуществляется проверка гипотез о законе распределения на основе  $\chi^2$  – критерия Пирсона и критерия Колмогорова.

Для проверки соответствия стандартным распределениям формируются величины  $b = P(\chi^2 \geq \chi_0^2)$  и  $c = P(\lambda \geq \lambda_0)$ , где в качестве стандартных распределений используются:

- нормальное распределение,
- равномерное распределение,
- распределение Релея,
- экспоненциальное распределение,
- логарифмическое нормальное распределение.

Пусть задана выборка случайных величин в виде матрицы  $A = \{x_i\}$ ,  $i = 1, n$ , где  $x_i$  – элементы выборки,  $n$  – объем выборки.

Алгоритм расчета характеристик распределения включает в себя определение следующих величин [50]:

- 1) среднего арифметического случайной величины  $x_i$ :

$$M_x = \frac{1}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i};$$

- 2) среднеквадратического отклонения (СКО):

$$S_x = \sqrt{1/n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2};$$

- 3) коэффициента вариации:

$$V = \left( \frac{S_x}{M_x} \right) \cdot 100\%;$$

- 4) размаха варьирования:

$R = X_{\max} - X_{\min}$ , где  $X_{\max}$ ,  $X_{\min}$  – максимальное и минимальное значения случайной величины в выборке соответственно;

- 5) центральных моментов 2-го, 3-го и 4-го порядков:

$$M_2 = \frac{1}{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2};$$

$$M_3 = \frac{1}{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^3};$$

$$M_4 = \frac{1}{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^4};$$

6) показателя асимметрии:  $A_s = \frac{M_3}{\sqrt{M_2^3}};$

7) Показатель эксцесса:  $\varepsilon = \frac{M_4}{M_2^2} - 3;$

8) среднеквадратических отклонений асимметрии и эксцесса:

$$S_{A_s} = \sqrt{\frac{6n(n-1)}{(n-2)(n+1)(n+3)}}, \quad S_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{24n(n-1)^2}{(n-3)(n-2)(n+3)(n+5)}}.$$

Перечисленные характеристики заносятся в матрицу  $A_m$ .

Приведем основные соотношения законов распределения, которые используются для проверки соответствия выборке случайных величин.

1. Нормальное распределение имеет функцию распределения:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S_x} \cdot \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x - M_x)^2}{2 \cdot S_x^2}\right) dx,$$

где  $S_x^2$  – дисперсия  $X$ ;

$M_x$  – среднее арифметическое значение.

2. Равномерное распределение имеет функцию распределения:

$$F(x) = \int_a^x f(x) dx = \begin{cases} \frac{(x-a)}{(b-a)} & \text{при } a \leq x \leq b; \\ 0 & \text{при } x < a, x > b, \end{cases}$$

где  $a$  и  $b$  – параметры закона распределения, равные

$$a = M_x - S_x \sqrt{3}, \quad b = M_x + S_x \sqrt{3}.$$

3. Распределение Релея имеет функцию распределения:

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = 1 - \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \text{ при } x \geq 0,$$

где  $\sigma$  – параметр распределения, равный  $\sigma = \frac{M_x}{1,253}$ .

4. Экспоненциальное распределение имеет функцию распределения:

$$F(x) = 1 - \exp(-\lambda x) \text{ при } x \geq 0,$$

где  $\lambda$  – параметр распределения, равный  $\lambda = \frac{1}{M_x}$ .

5. Логарифмически нормальное распределение.

Случайная неотрицательная величина  $X$  имеет логарифмическое нормальное распределение, если логарифм этой величины  $Y = \ln X$  распределен по нормальному закону:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S_y} \cdot \int_{x_0}^x \frac{\exp(-\ln x - \ln x_0)^2}{2 \cdot S_y^2} dx,$$

где параметры распределения  $\ln x_0$  – среднее арифметическое значение случайной величины  $Y$ ;  $S_y$  – СКО этой же величины.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
(справочное)  
Таблицы вероятностей

Таблица Б.1. Значения вероятностей  $P$  для критерия  $\chi^2$  (Пирсона)

$\chi^2$	Параметр $k$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,3173	0,6065	0,8013	0,9098	0,9626	0,9856	0,9948	0,9982	0,9994	0,9998
2	1574	3679	5724	7358	8491	9197	9598	9810	9915	9963
3	0833	2231	3916	5578	7000	8088	8850	9344	9643	9814
4	0455	1353	2615	4060	5494	6767	7798	8571	9114	9473
5	0254	0821	1718	2873	4159	5438	6600	7576	8343	8912
6	0143	0498	1116	1991	3062	4232	5398	6472	7399	8153
7	0081	0302	0719	1359	2206	3208	4289	5366	6371	7254
8	0047	0183	0460	0916	1562	2381	3326	4335	5341	6288
9	0027	0111	0293	0611	1091	1736	2527	3423	4373	5321
10	0016	0067	0186	0404	0752	1247	1886	2650	3505	4405
11	0009	0041	0117	0266	0514	0884	1386	2017	2757	3575
12	0005	0025	0074	0174	0348	0620	1006	1512	2133	2851
13	0003	0015	0046	0113	0234	0430	0721	1119	1626	2237
14	0002	0009	0029	0073	0156	0296	0512	0818	1223	1730
15	0001	0006	0018	0047	0104	0203	0360	0591	0909	1321
16	0001	0003	0011	0030	0068	0138	0251	0424	0669	0996
17	0000	0002	0007	0019	0045	0093	0174	0301	0487	0744
18	0000	0001	0004	0012	0029	0062	0120	0212	0352	0550
19	0000	0001	0003	0008	0019	0042	0082	0149	0252	0403
20	0000	0000	0002	0005	0013	0028	0056	0103	0179	0293
21	0000	0000	0001	0003	0008	0018	0038	0071	0126	0211
22	0000	0000	0001	0002	0005	0012	0025	0049	0089	0151
23	0000	0000	0000	0001	0003	0008	0017	0034	0062	0107
24	0000	0000	0000	0001	0002	0005	0011	0023	0043	0076
25	0000	0000	0000	0001	0001	0003	0008	0016	0030	0053
26	0000	0000	0000	0000	0001	0002	0005	0010	0020	0037
27	0000	0000	0000	0000	0001	0001	0003	0007	0014	0026
28	0000	0000	0000	0000	0000	0001	0002	0005	0010	0018
29	0000	0000	0000	0000	0000	0001	0001	0003	0006	0012
30	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0001	0002	0004	0009

Таблица Б.2. Значения вероятности  $P(\lambda)$  (по критерию Колмогорова)

$\lambda$	$P(\lambda)$	$\lambda$	$P(\lambda)$	$\lambda$	$P(\lambda)$
0,0	1,000	0,7	0,711	1,4	0,040
0,1	1,000	0,8	0,544	1,5	0,022
0,2	1,000	0,9	0,393	1,	0,012
0,3	1,000	1,0	0,270	1,7	0,006
0,4	0,997	1,1	0,178	1,8	0,003
0,5	0,940	1,2	0,112	1,9	0,002
0,6	0,864	1,3	0,068	2,0	0,001

Таблица Б.3. Значения функции Лапласа  $\Phi^*(x)$

$x$	$\Phi^*(x)$	$x$	$\Phi^*(x)$	$x$	$\Phi^*(x)$	$x$	$\Phi^*(x)$
0,00	0,5000	1,00	0,8413	2,00	0,9772	3,00	0,9986
0,05	0,5199	1,05	0,8531	2,05	0,9798	3,05	0,9988
0,10	0,5398	1,10	0,8643	2,10	0,9821	3,10	0,9990
0,15	0,5596	1,15	0,8749	2,15	0,9842	3,15	0,9992
0,20	0,5792	1,20	0,8849	2,20	0,9861	3,20	0,9993
0,25	0,5987	1,25	0,8943	2,25	0,9878	3,25	0,9994
0,30	0,6179	1,30	0,9032	2,30	0,9893	3,30	0,9995
0,35	0,6368	1,35	0,9115	2,35	0,9906	3,35	0,9996
0,40	0,6554	1,40	0,9192	2,40	0,9918	3,40	0,9997
0,45	0,6736	1,45	0,9265	2,45	0,9928	3,45	0,9997
0,50	0,6914	1,50	0,9332	2,50	0,9938	3,50	0,9998
0,55	0,7088	1,55	0,9394	2,55	0,9946	3,55	0,9998
0,60	0,7257	1,60	0,9452	2,60	0,9953	3,60	0,9998
0,65	0,7421	1,65	0,9505	2,65	0,9960	3,65	0,9999
0,70	0,7580	1,70	0,9554	2,70	0,9965	3,70	0,9999
0,75	0,7734	1,75	0,9599	2,75	0,9970	3,75	0,9999
0,80	0,7881	1,80	0,9641	2,80	0,9974	3,80	0,9999
0,85	0,8023	1,85	0,9678	2,85	0,9978	3,85	0,9999
0,90	0,8159	1,90	0,9713	2,90	0,9981	3,90	1,0000
0,95	0,8289	1,95	0,9744	2,95	0,9984	3,95	1,0000

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
(информационное)  
**БАЗА ДАННЫХ СИСТЕМНЫХ МОДУЛЕЙ**

**БД «СТРУКТУРА СТС»**

№ уровня	№ п/с	№ блока	№ модуля	Наименование элемента структуры	Пояснение
1	0	0	0	Надсистема	Отрасль, окружающая среда
2	0	0	0	СТС	Принципиальная схема
2	1	0	0	Элемент 1	Схема компоновки
2	2	0	0	Элемент 2	Схема компоновки
2	3	0	0	Элемент 3	Схема компоновки
3	1	1	0	Агрегат, блок, подсистема	Чертеж
3	1	1	1	Модули	Оптимизация
3	2	1	0	Агрегат, блок, подсистема	Чертеж
3	2	1	1	Модули	Оптимизация
3	3	1	0	Агрегат, блок, подсистема	Чертеж
3	3	1	1	Модули	Оптимизация
3	1	0	2	Модули	Оптимизация
3	2	0	2	Модули	Оптимизация
3	3	0	2	Модули	Оптимизация

**БД «БАНК БД»**

Название БД	Пояснение
Структура БД	БД системных модулей
Критерии	БД критериев всех уровней
Ограничения	Области дополнительных решений
Классы	БД классов
Объекты	БД объектов
Прототипы	БД прототипов
Технические решения	Опорные варианты (типовые)
Методы оптимизации	Множество методов оптимизации
Дополнительные условия	Неопределенность параметров
Начальная структура СТС	Задается из прототипов
Выходная структура СТС	Результат исследований
Экономические параметры	Для экономических расчетов
Противодействие	Конфликтные ситуации в СТС
Связи модулей структуры	Схема связей всех типов
Реакция модулей	Схема реакций модулей
Исходные данные	По всем модулям СТС
Выходные данные	По всей СТС и модулям
Узкие места структуры	Перечень мест в структуре
Узлы насыщения	Перечень узлов в структуре
Альтернативные варианты	Результаты исследований
Ранжированные варианты	Ранжированные варианты ТО

### БД «МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ»

№ п/п	№ раздела	№ метода	Метод
1	1	1	Функции одной переменной
2	1	2	Функции n переменных
3	1	3	Метод Ньютона
4	2	2	Поиск методом Фибоначчи
5	2	3	Поиск методом «золотого» сечения
6	2	4	Аппроксимация кривыми
7	2	5	Квадратичная интерполяция
8	2	6	Кубическая интерполяция
9	3	2	Метод Хука-Дживса
10	3	3	Метод Пелленра-Мидо
11	4	1	Метод наискорейшего спуска
12	4	2	Квадратичные функции
13	4	3	Метод Давидсона-Флетчера-Пауэлла
14	4	4	Метод Флетчера-Рипса
15	5	1	Ограничения в виде равенств
16	5	2	Ограничения в виде неравенств
17	5	3	Выпуклости и вогнутости
18	6	1	Модифицированный Хука-Дживса
19	6	2	Комплексный метод
20	7	1	Штрафные функции
21	7	2	Метод SUMT Фиакко и Маккормика

### БД «КРИТЕРИИ»

Виды критериев	Пояснения
$F(X)$	Функционал качества
$U$	Допустимый уровень качества
$N$	Число образцов
$F(X,Y,Z)$	Закон распределения
$K_i$	Численный показатель
$P_i$	Вероятностные характеристики
$ P_i^{треб} - P_i(\alpha_j, \beta_j)  < \varepsilon_0$	Вероятностный
$D(F(\alpha_j, \beta_j)) = \min_{\alpha} \{ \max_j   F_j^{треб} - F_j(\alpha_j, \beta_j)   \}$	$D$ -показатель критерия согласия Колмогорова; $F_j^{треб}$ - эталонный оптимальный закон распределения величины; $F_j(\alpha_j, \beta_j)$ - закон распределения в функции параметров $j$ -ой подсистемы (уровня).
$R_i^{треб} - \sum Ri < \varepsilon_0$	$Ri$ - ресурсные характеристики $k$ -ой подсистемы.
$K_{го}$	Критерий ранжирования альтернативных вариантов
$\max_{\mu} \min_{\nu} W'_{\mu\nu}$	Максиминный критерий Вальде
$\min_{\mu} \max_{\nu} r_{\mu\nu}$	Минимаксный риск
$\max_{\mu} 1/\chi \sum_{\nu=1}^{\chi} W_{\mu\nu}$	Лапласа (равновероятный)
$\max_{\mu} [\gamma \min_{\nu} W'_{\mu\nu} + (1-\gamma) \max_{\nu} W_{\mu\nu}]$	Пессимистически-оптимистический

Виды критериев	Пояснения
$W(X,t,R,P)$	Общий; $R$ – вектор реакций; $P$ –вектор противодействия
$W_{ij}(X_{ij},t,R_{ij},P_{ij})$	Обобщенный
$W_{ijk}$	Частный
$\eta$	Относительный; [0,1]

### БД «ОЦЕНКА РИСКА»

Состояние	Параметр	Решение
Определенное	Численное значение	Учитывается
Риск	Закон распределения	Методы теории вероятности
Неопределенность	а). Диапазон	Методами принятия решения в условиях неопределенности
	б). Наименование параметра	
Неосведомленность	Ничего не известно о факторе	Невозможно (это источник ошибок)

### БД «РЕЗУЛЬТАТЫ

Наименование	Директория
Таблицы	TABL
Графики	GRAFIK
Номограммы	NOMOGR
Аналитические зависимости	ANZAV
Нелинейные зависимости	NEZAV
Ряд альтернативных вариантов	ALTVAR
Технический облик	TEXOBL

### БД «ОГРАНИЧЕНИЯ»

Виды	Тип	Пояснения
$G(x,y,z)=0$	Равенство	$\{x,y,z\}=X$ вектор состояния СТС
$F(t)=0$	Равенство	$t$ – время
$F(x,t)=0$	Равенство	
$G_i(X) < b_i$	Неравенство	
$F(t) < c$	Неравенство	
$F_i(X,t) < d_i$	Неравенство	
$[S_1, S_2]$	Область	$S$ – область функционирования СТС.
$(D_1, D_2)$	Диапазон	$D$ – значение какого-либо параметра произвольного модуля СТС
$X_{кр}$ или $T_{кр}$	Точка	Критическое состояние

**ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА  
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

**БД «ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА  
1-ГО УРОВНЯ»**

Наименование показателя	Пояснение
Безотказность	Способность выполнения заданных функций без проявления отказов
Корректность	Соответствие заданным функциональным требованиям
Мобильность	Возможность приспособления к работе в другой программно-технической среде
Модифицируемость	Приспособленность к внесению изменения при создании и сопровождении
Проверяемость	Приспособленность к проверке на соответствие заданным требованиям и полнота проверки
Пригодность к развитию	Приспособленность к доработкам, направленным на повышение эффективности и наращивание функциональных возможностей
Совместимость	Приспособленность к совместной работе с другим системами и программами
Сопровождаемость	Приспособленность к локализации и устранению ошибок в ходе создания и сопровождения
Удобство использования	Удобство в работе и для изучения
Унифицированность	Приспособленность для применения в качестве унифицированной составной части для другой системы
Устойчивость	Способность сохранять работоспособность системы в условиях проявления отказов и сбоях технических средств
Целостность	Защищенность программ и данных от несанкционированного доступа

**БД «ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА  
2-ГО УРОВНЯ»**

Наименование показателя	Пояснение
Виртуальность	Оценка возможности для пользователей работать с системой на функционально-логическом уровне, не зная способности ее физической организации
Контролируемость доступа	Оценка возможностей программ, обеспечивающих контроль доступа к программам и данным системы
Коммуникативность	Оценка удобства представления входных и выходных данных
Контролируемость отказов	Оценка возможностей программ, обеспечивающих сохранение и восстановление работоспособности системы в условиях проявления отказов и ошибочных ситуаций
Модульность	Оценка соблюдения принципа модульного программирования, обеспечивающего независимость и функциональную целостность модулей
Наращиваемость	Оценка приспособленности программ к наращиванию функциональных возможностей
Простота программ	Оценка простоты понимания программ на основе изучения исходных текстов
Полнота тестирования	Оценка полноты автономного и комплексного тестирования программ
Согласованность описаний	Оценка непротиворечивости описаний функций, программ и данных в программной документации
Точность	Оценка обеспечения заданной точности вычислений и представлений данных
Удобство изучения	Оценка свойств программ и документации, обеспечивающих удобство изучения
Удобство в работе	Оценка удобства взаимодействия пользователя с программой благодаря обеспечению гибкости диалога и представлению помощи в затруднительных ситуациях

В работах [54, 65] приведены характеристики показателей качества продукции (по Методическим указаниям РД 50-64-84).

Показатели назначения характеризуют свойства продукции, определяющие основные функции для выполнения которых она предназначена, и обуславливают область ее применения. К ним относятся показатели функциональные и технической эффективности, конструктивные показатели и показатели состава и структуры.

Показатели надежности характеризуют свойства безотказности, долговечности, ремонтнопригодности и сохраняемости.

Показатели экономного использования материалов и т.п.

Эргономические показатели характеризуют систему «человек-изделие» (в частности, «человек-машина»).

Эстетические показатели характеризуют информационную выразительность, рациональность формы и совершенство производственного исполнения.

Показатели технологичности характеризуют свойства состава и структуры продукции.

Показатели стандартизации и унификации характеризуют насыщенность продукции стандартными унифицированными составными частями.

Подробнее об этих и других показателях можно ознакомиться в указанных выше работах.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b>	3
<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	4
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ</b>	8
<b>Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА</b>	9
1.1. Основные понятия сложных систем	9
1.2. Системный анализ	14
1.3. Технический облик системы	19
1.4. Обобщенная схема системного анализа	21
1.5. Система критериев. Принципы системного анализа	24
1.6. Методология применения системного анализа	27
1.7. Прямая и обратная задачи	30
1.8. Декомпозиция системы	35
1.9. Представление общего функционала в виде составляющих по блокам структуры комплекса	37
<b>Глава 2. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ</b>	41
2.1. Спектральный метод ранжирования альтернативных вариантов	41
2.2. Отбраковка параметров сложных систем с помощью спектрального метода	50
2.3. Сравнение спектрального метода с другими методами	53
2.4. Сравнение выборки случайных величин с законами распределения	66
2.5. Теоретический закон распределения величин	69
2.6. Однопараметрическая оптимизация по методу Фибоначчи	72
2.7. Многопараметрическая оптимизация по методу Хука–Дживиса	75
2.8. Численный метод оптимизации системы	82
2.9. Оценка тенденции развития СТС	84
<b>Глава 3. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА К ОБЩЕЙ СТРУКТУРЕ СТС</b>	88
3.1. Общее представление СТС	88
3.2. Формирование перечня системных связей СТС	98
3.3. Декомпозиция СТС	103
3.4. Разбиение общего критерия эффективности по подсистемам	111
3.5. Методология проектирования СТС	113
3.6. Формирование технического облика СТС	126
3.7. Полуаналитический метод исследования СТС	132
<b>Глава 4. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА К ПОДСИСТЕМАМ СТС</b>	151
4.1 Общее представление подсистем СТС	151

4.2. Формирование перечня системных связей подсистем СТС	159
4.3. Определение частных и обобщенных критериев эффективности подсистем СТС	159
4.4. Методика проектирования подсистем СТС	165
4.5. Оптимизация параметров подсистем СТС	172
4.6. Формирование технического облика подсистем СТС	174
4.7. Этапы оценки подсистем СТС	177
<b>Глава 5. ПРИМЕР ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ - САМОНАВОДЯЩАЯСЯ ПАРАШЮТНАЯ СИСТЕМА</b>	<b>181</b>
5.1. Общее представление СПС	181
5.2. Формирование перечня системных связей СПС	187
5.3. Декомпозиция СПС	190
5.4. Разбиение общего критерия эффективности на подсистемы	191
5.5. Методы проектирования СПС	195
5.6. Моделирование функционирования СПС	198
5.7. Формирование технического облика СПС	203
5.8. Оптимизация параметров СПС	206
5.9. Этапы оценки СПС	206
<b>Глава 6. ПРИМЕР ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОДСИСТЕМЫ СПС - АКУСТИЧЕСКИЙ КАНАЛ</b>	<b>208</b>
6.1. Общее представление акустического канала как подсистемы СПС	208
6.2. Формирование перечня системных связей акустического канала	210
6.3. Декомпозиция акустического канала	211
6.4. Определение частных и обобщенных критериев эффективности акустического канала	215
6.5. Методика проектирования акустического канала	216
6.6. Формирование технического облика акустического канала	223
6.7. Этапы оценки акустического канала	225
<b>Глава 7. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ</b>	<b>242</b>
7.1. Общие сведения	242
7.2. Виды противодействия	244
7.3. Методика учета внешних воздействий	257
7.4. Основы радиоэлектронной борьбы	261
7.5. Методика защиты СТС	266
7.6. Оценка СТС различной структуры	277
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>	<b>282</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. Расчет параметров закона распределения случайных величин</b>	<b>287</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Таблицы вероятностей</b>	<b>290</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В. База данных системных модулей и показатели качества программного обеспечения</b>	<b>292</b>

*Научное издание*

Абраменко Геннадий Викторович

Власов Кирилл Владимирович

Краснощеков Михаил Андреевич

**ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ  
СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СЛОЖНЫХ  
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Редактор: Г.В. Еременко

Подписано в печать 15.08.2015. Формат 60 x 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Усл. печ. л. 17,5. Тираж 200 экз. Заказ № 1768

Типография ООО “Оргсервис-2000”

Адрес типографии: 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3.

ISBN 978-5-98115-180-4



9 785981 151804