Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования

«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиотехнических систем

**А. М. Гладышев, И. Н. Давыденко**

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ  
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

Рекомендовано УМО по образованию в области информатики и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия для специальностей 1-39 01 02 «Радиотехнические системы» и 1-39 01 04 «Радиоэлектронная защита   
информации»

Минск, БГУИР 2014

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС

## Основная цель и задачи изучаемой дисциплины

Цель – освоение основ проектирования и эксплуатации РЭС; методов моделирования и оптимизации РТУ и РТС с применением пакетов программ Mathcad и Matlab.

**Задачи:**

***Изучить***:

* способы применения программных средств при проектировании, моделировании и оптимизации РЭС;
* методы статистического моделирования РЭС;
* методы оптимизации;
* методы адаптации;
* методологию проектирования РТС.

***Научиться***:

* анализировать РЭС с применением критериев эффективности;
* рассчитывать показатели надежности, скрытности, помехозащищенности;
* пользоваться математическими пакетами Mathcad, Matlab при решении задач проектирования РЭС,
* производить статистическое моделирование РЭС;
* проектировать РЭС с применением системного подхода.

## Этапы жизненного цикла РЭС и их содержание

*Жизненным циклом РЭС* называют совокупность периодов их проектирования, производства, технической эксплуатации и практического использования, модернизации, частичной или полной замены по мере технического износа и «морального» старения.

Жизненный цикл любого технического объекта можно разделить на четыре основные стадии:

1. концептуальное проектирование;
2. техническое проектирование;
3. производство;
4. эксплуатация.

Каждая из этих стадий состоит из отдельных этапов. На стадии *концептуального проектирования* определяются:

− необходимость и принципиальная возможность создания РЭС;

− критерии проектирования РЭС;

− внешний облик РЭС;

− затраты на проектирование, изготовление, эксплуатацию и утилизацию;

− основные тактико-технические характеристики (ТТХ) РЭС;

− техническое задание на проектирование системы.

Стадия *технического проектирования*, этапы которой и содержание выполняемых на них работ строго определены ГОСТом, включает:

− разработку технического предложения;

− разработку эскизного проекта;

− разработку технического проекта;

− разработку рабочего проекта (разработка РКД опытного образца, опытной партии).

Техническое предложение, эскизный проект и технический проект различаются глубиной проработки. Техническое проектирование обычно проводят с учетом замечаний, полученных по эскизному проекту, с задачей подготовки технической документации, необходимой для создания опытного образца. Составной частью технического проектирования является конструирование аппаратуры. Его проводят с учетом условий эксплуатации РЭС, допустимых массогабаритных характеристик, располагаемой элементной базы, имеющейся и перспективной технологии производства, положений государственных и отраслевых стандартов. После защиты технического проекта возможно принятие решения на изготовление и испытание опытного образца. Рабочий проект, в процессе которого изготавливаются опытные образцы и проводятся испытания с последующей корректировкой по их результатам технической документации, является самым длительным и трудоемким этапом технического проектирования. Этот цикл (доводка изделия) повторяется до тех пор, пока опытный образец не будет полностью удовлетворять требованиям технического задания (ТЗ). Этапы технического и рабочего проекта принято объединять под общим названием опытно-конструкторские работы (ОКР), которые заканчиваются испытаниями опытного образца системы. В зависимости от важности и сложности разрабатываемой РЭС испытания могут быть заводскими, межфирменными или государственными. Решение о принятии системы и ее серийном производстве принимается по результатам этих испытаний.

На стадии серийного *производства* производятся:

− технологическая подготовка производства РЭС;

− изготовление, сборка и настройка образцов РЭС;

− заводские испытания образцов РЭС;

− складирование образцов РЭС.

Стадия серийного производства в отличие от опытного рассчитана на более широкую кооперацию подразделений и организаций. Подготовку производства нацеливают на совершенствование его технологии и организации, включая контроль качества изделий, на повышение производительности труда. Лица, приступающие к производству РЭС, перенимают опыт разработчиков. Серийные образцы РЭС подвергаются периодическим контрольным испытаниям на соответствие их показателям, уточненным при приеме опытного образца.

На стадии *эксплуатации* осуществляется:

− доставка системы;

− ввод ее в эксплуатацию;

− приведение в установленную степень готовности к использованию;

− использование по назначению;

− техническое обслуживание и ремонт;

− хранение;

− транспортировка;

− модернизация (с последующей эксплуатацией);

− снятие с эксплуатации.

Ввод РЭС в эксплуатацию производится после изготовления или капитального ремонта и предусматривает подготовительные работы: контроль, приемку и закрепление элементов РЭС за подразделениями; документальное оформление готовности к штатной эксплуатации. Важнейшими составными частями эксплуатации РЭС являются контроль над техническим состоянием объекта (готовность к работе по назначению) и техническое обслуживание объекта, рассчитанные на повышение готовности к выполнению поставленных задач. Снятие с эксплуатации осуществляют после документального оформления наступления, так называемого предельного состояния объекта эксплуатации, когда дальнейшее использование и ремонт РЭС оказываются невозможными или нецелесообразными. В этом случае производится утилизация РЭС.

Таким образом, в процессе жизненного цикла целесообразность, или практическая достижимость целей создания системы (рис. 1.1), сначала возрастает, проходя последовательно периоды становления и развития, а затем снижается, проходя периоды регресса и модернизации. В процессе модернизации какое-то время удается поднимать целесообразность до некоторого приемлемого уровня, но затем система настолько устаревает, что затраты на модернизацию дают слишком мало эффекта, и система гибнет (снимается с эксплуатации и утилизируется).



Рис. 1.1. Графическое представление жизненного цикла РЭС

## Информационная поддержка этапов жизненного цикла с использованием ЭВМ

Информационная поддержка жизненного цикла (ЖЦ) изделий получила аббревиатуру **ИПИ**. Концепция **ИПИ** является аналогом зарубежных информационных систем CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывные поставки и информационная поддержка жизненного цикла изделий), или PLM (Product Lifecycle Management – управление жизненным циклом изделия). В настоящее время в мире функционируют несколько десятков организаций из различных стран, занимающихся вопросами развития CALS-технологий. Работа различных организаций в сфере CALS координируется международными организациями, в число которых входит ISO, занимающаяся международной координацией в области стандартизации.

Для взаимодействия в рамках ИПИ (CALS, PLM) создается интегрированная информационная среда (ИИС), которая обеспечивает непрерывный обмен данными между заказчиком, производителями и потребителями. ИИС представляет собой распределенное хранилище данных, существующее в сетевой компьютерной системе, охватывающей все службы и подразделения предприятия. В ИИС действует единая система правил представления, хранения и обмена информацией. Информация, однажды возникшая на каком-либо этапе ЖЦ, сохраняется в ИИС и становится доступной всем участникам этого и других этапов. Управление данными в информационном пространстве, едином для различных автоматизированных систем, возлагается на систему управления жизненным циклом продукции, реализующую технологии PLM (Product Lifecycle Management). Технологии PLM объединяют методики и средства информационной поддержки изделий на протяжении всех этапов жизненного цикла изделий. Это позволяет сократить затраты труда, времени и финансовых ресурсов при проектировании и освоении производства сложных изделий.

Основные типы автоматизированных систем, используемых в жизненном цикле изделии, приведены на рис. 1.2.

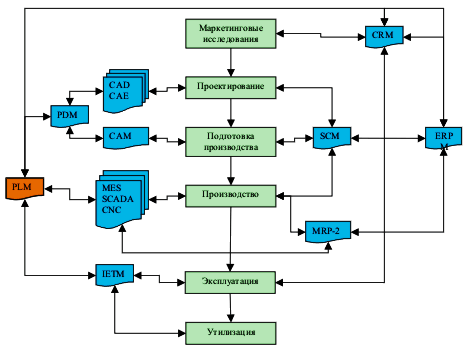


Рис. 1.2. Системы автоматизации этапов жизненного цикла промышленных изделий

На этапе проектирования выделяют САПР функционального, конструкторского и технологического проектирования. САПР функционального проектирования называют системами расчетов и инженерного анализа, или системами CAE (Computer Aided Engineering). САПР конструкторского проектирования называют системами CAD (Computer Aided Design). САПР технологического проектирования составляют часть технологической подготовки производства и выполняют в системах CAM (Computer Aided Manufacturing). Для совместного функционирования компонентов САПР различного назначения и координации работы систем САЕ/СAD/САМ разрабатываются системы, получившие название систем управления проектными данными PDM (Product Data Management).

Информационная поддержка этапа производства продукции осуществляется автоматизированными системами управления предприятием (АСУП) и автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУТП). К АСУП относятся системы планирования и управления предприятием ERP (Enterprise Resource Planning), планирования производства и требований к материалам MRP-2 (Manufacturing Requirement Planning). Системы ERP выполняют различные бизнес-функции, связанные с планированием производства, закупками, сбытом продукции, анализом перспектив маркетинга, управлением финансами, персоналом, складским хозяйством, учетом основных фондов. Системы MRP-2 ориентированы на бизнес-функции, непосредственно связанные с производством. Промежуточное положение между АСУП и АСУТП занимает производственная исполнительная система MES (Manufacturing Execution Systems), предназначенная для решения оперативных задач управления проектированием, производством и маркетингом. В состав АСУТП входит система SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), выполняющая диспетчерские функции (сбор и обработка данных о состоянии оборудования и технологических процессов) и помогающая разрабатывать ПО для встроенного оборудования. Для непосредственного программного управления технологическим оборудованием используют системы СNC (Сomputer Numerical Control) на базе контроллеров (специализированных компьютеров, называемых промышленными), которые встроены в технологическое оборудование с числовым программным управлением (ЧПУ).

На этапах подготовки производства, производства и реализации требуются услуги системы управления «цепочками» поставок – Supply Chain Management (SCM). Управление цепью поставок подразумевает продвижение материального потока с минимальными издержками. На этапе реализации продукции выполняются функции управления отношениями с заказчиками и покупателями, проводится анализ рыночной ситуации, определяются перспективы спроса на планируемые изделия. Эти функции возложены на систему CRM.

На этапе эксплуатации функции обучения обслуживающего персонала возложены на интерактивные электронные технические руководства IETM (Interactive Electronic Technical Manuals), с их помощью выполняются диагностические операции, поиск отказавших компонентов, заказ дополнительных запасных деталей и некоторые другие операции.

Характерная особенность информационной поддержки жизненного цикла изделий PLM – обеспечение взаимодействия, как средств автоматизации разных производителей, так и различных автоматизированных систем многих предприятий, т. е. технологии PLM являются основой, интегрирующей информационное пространство, в котором функционируют САПР, ERP, PDM, SCM, CRM и другие автоматизированные системы многих предприятий.

## Общие сведения о проектировании. Внутреннее и внешнее проектирование

*Проектирование* можно рассматривать как последовательность решений задач, направленную на создание РЭС, отличающейся более высокой эффективностью, чем существующие.

При проектировании к разрабатываемой РЭС предъявляются некоторые требования, основными из которых являются: точность, помехозащищенность, пропускная способность, электромагнитная совместимость, надежность, масса, габариты и стоимость. Количественно требования к РЭС характеризуются соответствующими показателями (показателями точности, помехозащищенности, надежности и др.)  , называемыми *показателями качества*. Упорядоченная совокупность показателей качества  образует *вектор  качества системы*. Задача проектирования системы состоит в выборе такого варианта *S* ее построения, который удовлетворяет всей совокупности исходных данных. Совокупность исходных данных при проектировании может быть записана в следующем виде:

,

где  – условия работы системы;

 – ограничения, накладываемые на структуру системы и ее параметры;

 – состав вектора ** качества системы (без количественного определения);

 – критерий качества системы (ограничения на показатели качества).

Обоснование исходных данных производится из назначения проектируемой системы и называется *внешним проектированием*. Выбор структуры и значений параметров системы, удовлетворяющих всей совокупности исходных данных, называется *внутренним проектированием*.

Под условиями работы понимают характеристики полезных сообщений и сигналов, характеристики помех, диапазон температур, давлений, влажности и т. д.

Совокупность  содержит ограничения на структуру системы и значения ее параметров. К ограничениям на структуру можно отнести, например, требования одноканальности системы. Совокупность  может задаваться в виде равенств, неравенств, функциональных связей и т. д.

Вектор  включает те показатели качества, которые должны учитываться в процессе оптимизации. Численные значения составляющих вектора ** варьируются в процессе синтеза.

Критерий качества системы содержит ограничения, накладываемые на величины показателей качества, которые задаются в виде равенств, неравенств или связей.

Система, удовлетворяющая совокупности условий  и ограничений ,  
 называется *допустимой.* Если она удовлетворяет еще и критерию качества *,* то ее называют *строго допустимой*. Строго допустимая система удовлетворяет всем требованиям .

Из всех строго допустимых систем оптимальной считается система, которая обладает наилучшим в определенном смысле значением вектора ** избранных показателей качеств. Для выбора оптимальной системы должен быть установлен и обоснован критерий предпочтения, т. е. выработано правило, на основании которого вектор значений показателей качества можно было бы считать лучшим (худшим), чем вектор .

Синтез системы, проводимый с учетом нескольких показателей качества, т. е. на основе вектора **, называется *векторным.* Синтез, проводимый по единственному показателю качества ** = *k*, называется *скалярным.* Скалярный синтез разработан лучше и осуществляется проще, поэтому векторный синтез, как правило, сводят к скалярному.

## Радиоэлектронная система как объект проектирования

*Радиоэлектронные системы классифицируются* по различным признакам, основным из которых является функциональное назначение. Радиоэлектронные системы делятся на *информационные* и *энергетические*. Информационные РЭС предназначены для передачи, извлечения и преобразования информации.

*Информационные системы* по назначению делятся на следующие основные классы (табл. 1.1):

* системы передачи информации;
* системы извлечения информации;
* системы разрушения информации;
* системы радиоуправления.

Системы передачи информации предназначены для перемещения информации из одних пунктов пространства в другие. К ним относятся системы радиовещания и телевизионного вещания, системы связи, радиотелеметрические системы и системы передачи команд.

Таблица 1.1

Виды информационных систем

|  |  |
| --- | --- |
| **Система** | **Вид системы** |
| Передачи информации | Системы связи (многоканальная радиосвязь, радиорелейная связь, связь через искусственные спутники Земли, мобильная радиосвязь, оптические линии связи)  Радиовещание и телевидение  Телеметрия  Передача команд |
| Извлечения (обнаружения и измерения) информации | Локация  Навигация  Астрономия  Разведка |
| Управления | Лазерное, радиоуправление ракетами  Радиоуправление космическим аппаратом |
| Разрушения информации | Оптическое, радиопротиводействие |
| Информационные системы | ПЭВМ, вычислительные комплексы, вычислительные сети |
| Комбинированные системы (комплексирование систем) | Комплексы военного назначения, автоматизированные и автоматические системы управления  Комбинированные системы осуществляют выполнение функций, свойственных двум или более системам, различным по функциональному назначению (передачи, извлечения, разрушения информации, управления) |

Системы извлечения информации предназначены для извлечения информации об объектах с помощью радиосредств. К ним относятся системы радиолокации, радиоастрономии, радиоразведки природных ресурсов, радионавигации.

Системы радиопротиводействия создают радиопомехи системам передачи или извлечения информации для разрушения циркулирующей в них информации.

Системой радиоуправления называется система управления, в которой радиосредства играют основную функцию. Главной областью применения систем радиоуправления является управление полетом летательных аппаратов (самолетов, ракет, космических аппаратов и др.). Радиосредства в системах радиоуправления применяют для извлечения и передачи информации. Система радиоуправления обычно является системой автоматического управления с обратной связью, а радиосредства извлечения и передачи информации рассматриваются как звенья замкнутой системы радиоуправления наряду с автопилотом, кинематическим звеном и устройством формирования команд управления.

Методы проектирования существенно зависят от назначения проектируемой системы. Для каждого класса РЭС разрабатывается соответствующая теория проектирования: теория проектирования радиолокаторов, теория проектирования систем связи и т. д. Однако имеется ряд важных вопросов проектирования, которые являются общими для РЭС различных классов. Это вопросы точности, помехозащищенности, пропускной способности, электромагнитной совместимости, надежности, массы, габаритов и стоимости. Важно установить числовые показатели качества, соответствующие этим требованиям, факторы, на них влияющие, и пути улучшения показателей качества. Общей проблемой проектирования является проблема сведения векторного показателя качества к скалярному. Общими для различных классов РЭС являются вопросы системного подхода к проектированию и вопросы методов проектирования: математические, экспериментальные и эвристические. При этом рассматриваемые общие методы проектирования справедливы как при проектировании систем, так и при проектировании их частей: радиопередающих, радиоприемных и других устройств.

Проектирование сложных систем основано на блочно-иерархическом рассмотрении РЭС. Суть блочно-иерархического рассмотрения состоит в расчленении представлений об объекте проектирования на ряд *иерархических уровней*, называемых *уровнями абстрагирования*. *Цель расчленения* – замена малого числа проектных задач чрезмерной сложности большим числом задач допустимой сложности. Уровни абстрагирования различаются степенью детализации представлений об объекте. Каждому уровню соответствует свое определение системы и элемента. Части объекта, рассматриваемые как элементы на к-ом уровне, описываются как системы на соседнем более низком (к +1)-м уровне.

Кроме декомпозиции представлений об объекте применяют расчленение представлений об объекте по характеру отражаемых свойств объекта на ряд *аспектов*. Аспект, связанный с описанием принципов действия и процессов функционирования объекта, называется *функциональным*. Если процессы функционирования имеют сложную физическую природу, функциональный аспект может быть разделен на несколько более узких аспектов, каждый из которых связан с описанием физически однородных процессов: например, электрическая и оптическая подсистемы и соответственно электрический и оптический аспекты.

Кроме функционального, к основным аспектам относят *конструкторский* и *технологический* аспекты. Данные аспекты связаны с описанием конструкций и технологии изготовления изделий.

В каждом аспекте вводятся свои уровни абстрагирования. В функциональном аспекте выделяют системный уровень, функционально-логический уровень, схемотехнический уровень и компонентный уровень. На *системном уровне* в качестве систем рассматриваются РЭС: радиолокатор, система связи, радионавигационная система, система постановки помех, а в качестве элементов рассматривают блоки (устройства) аппаратуры (передатчик, приемник и т. п.). На *функционально-логическом уровне* блоки рассматриваются как системы, состоящие из электрорадиоэлементов (транзисторов, резисторов, конденсаторов и т. п.). На *компонентном уровне* рассматриваются процессы, имеющие место в схемных компонентах.

Конструкторскому аспекту присуща своя иерархия конструктивов, включающая уровни описания стоек, рам, панелей, типовых элементов замены (ТЗ), дискретных компонентов, микросхем и т. д.

В технологическом аспекте рассматриваются иерархические уровни описания технологических процессов в виде принципиальных схем, маршрутов, совокупности операций и переходов.

Иерархия в радиотехнике может быть представлена согласно табл. 1.2.

Таблица 1.2

Иерархический принцип в радиотехнике

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Функциональная иерархия** | **Конструктивная иерархия** | **Грамматическая иерархия** |
| Комплекс | Комплекс | Сложное предложение |
| Система | Станция | Предложение |
| Устройство | Блок | Слово |
| Цепь | Узел (плата) | Слог |
| Элемент | Деталь | Буква |

## Основные виды задач проектирования

По степени новизны проектируемой системы различают следующие типичные задачи проектирования:

− *частичная модернизация* существующей системы – изменение ее параметров и иногда структуры, вызывающее сравнительно небольшое улучшение одного или нескольких основных показателей качества;

− *существенная модернизация* – изменение параметров и структуры системы, вызывающее значительное улучшение одного или нескольких основных показателей качества;

− *создание новой системы*, основанной на новых принципах действия для резкого улучшения одного или нескольких основных показателей качества при решении тех же или новых задач.

По степени сложности задачи проектирования можно разделить на простые, средней сложности, сложные. К простым относят задачи проектирования, для решения которых достаточно коллектива инженеров в количестве не более 10 человек. Решение задач проектирования средней сложности требует нескольких десятков или сотен инженеров. Решение сложных задач проектирования требует несколько тысяч или десятков тысяч инженеров.

## Этапы проектирования

С точки зрения решаемых задач процесс проектирования можно разбить на следующие этапы:

* выбор и формулировка цели проектирования;
* обоснование исходных данных;
* определение принципов построения системы;
* аппаратурный синтез;
* конструирование;
* разработка технологии изготовления;
* разработка испытательной аппаратуры.

На *первом этапе* под выбором и формулировкой цели понимают качественную (словесную) формулировку задачи проектирования: какая система и для решения каких задач она должна быть разработана. Для этого необходимо предварительно проанализировать потребности общества, возможности, предоставляемые современным развитием науки и техники вообще и радиоэлектроники в частности, учтены результаты прогнозирования дальнейшего развития радиоэлектронных и близких к ним по структуре или по решаемым задачам систем.

На *втором этапе* проектирования дается количественная формулировка задачи проектирования в виде обоснования исходных данных: условий работы системы; ограничений на структуру системы и ее параметры; вид учитываемых показателей качества и предъявляемых к ним требований. При обосновании исходных данных учитывают назначение системы и основные виды ее взаимодействия с окружающей средой и с другими системами. Обоснование исходных данных соответствует внешнему проектированию. Последующие этапы соответствуют внутреннему проектированию. Обоснование исходных данных производится совместно разработчиками, заказчиками и потребителями и включает в себя патентные исследования.

На *третьем этапе* проектирования (начало внутреннего проектирования) определяют принципы построения системы. В результате должно быть обосновано деление проектируемой системы на подсистемы (устройства), сформулированы исходные данные для всех подсистем и определены принципы их действия. На этом этапе выбирают: рабочий диапазон длин волн; принципы извлечения, передачи и обработки информации; тип сигнала – переносчика информации; принципы пространственных и временных преобразований сигналов; принципы объединения и разделения каналов и станций; принципы модуляции и демодуляции; принципы кодирования и декодирования. Третий этап проектирования позволяет относительно точно определить значения лишь информационных показателей качества (точности, разрешающей способности, помехоустойчивости, пропускной способности и др.). Экономические и конструктивно-технологические показатели (стоимость, масса, объем, надежность и др.) оцениваются очень приближенно.

Задачей *четвертого этапа* (аппаратурного синтеза) является аппаратная реализация выбранных на предыдущем этапе принципов построения системы. При этом выбирают элементную базу и оптимизируют структуру и параметры подсистем с более точным учетом не только информационных, но и остальных показателей качества, включая конструктивно-технологические и экономические. В задачи данного этапа входят обоснование методики проведения испытаний и разработка нестандартной испытательно-измерительной аппаратуры.

На *пятом этапе* (конструирование) оптимизируют систему по ее конструктивно-технологическим и экономическим показателям, окончательно определяют эти показатели и составляют техническую документацию, необходимую для изготовления опытных образцов, а затем и для серийного производства.

*Шестой этап* проектирования включает в себя разработку технологии изготовления опытных и серийных образцов.

Первые три этапа проектирования называются *системотехническими*, так как на этих этапах части системы подробно не рассматриваются и главное внимание уделяется функционированию и характеристикам системы в целом. Этап аппаратурного синтеза иногда называется *схемотехническим*, так как на этом этапе обосновывается принципиальная схема системы.

Таким образом, процесс проектирования с точки зрения решаемых задач можно разбить на три больших этапа:

− системотехнический этап;

− схемотехнический этап;

− конструкторско-технологический этап.

Соответственно среди инженеров, осуществляющих проектирование, существует градация: системотехники, схемотехники, конструкторы и технологи. Задачи конструкторов и технологов схожи, однако конструктор должен сообщить технологу, что будет представлять собой разрабатываемая система, а технолог должен определить, как эту систему можно изготовить. В последнее время к данным категориям инженеров присоединяются инженеры-математики (программисты). В большей степени востребованы схемотехники, конструкторы, технологи и программисты. В меньшей степени по количеству (но не по важности решаемых задач) требуются системотехники.

С точки зрения организации процесса проектирования стадии разработки изделий определяются ГОСТ 2.103-68 ЕСКД. Стадии разработки состоят из следующих основных этапов.

1. Техническое задание (ТЗ) должно содержать:

− данные о назначении изделия;

− его тактико-технические характеристики;

− условия эксплуатации;

− показатели качества;

− технико-экономические характеристики;

− состав КД и стадии ее разработки.

После согласования и утверждения ТЗ заказчиком и разработчиком оно *становится документом, на основании которого выполняются все остальные этапы работы*. В случаях, когда заранее неизвестны количественные характеристики системы и возможность ее физической реализации, разработке ТЗ предшествует НИР или аван-проект.

2. Техническое предложение. На этой стадии производится анализ ТЗ, сравнительная оценка разрабатываемого и существующих изделий, оценка различных вариантов возможного решения поставленной задачи. На основании этих материалов дается техническое, а также технико-экономическое обоснование целесообразности разработки конструкторской документации (КД) нового изделия. Работа над техническим предложением заканчивается рассмотрением и утверждением его заказчиком.

3. Эскизный проект. На этой стадии выбирают оптимальные варианты исполнения изделия, его структурную схему и принцип конструктивного исполнения. Для этого делают необходимые расчеты, разрабатывают схемы, эскизы, изготавливают и испытывают макеты отдельных частей или всего изделия, выбирают основную элементную базу, на которой будет построена схема изделия (полупроводниковые приборы, микросхемы и т. п.). Документация эскизного проекта должна содержать данные о назначении изделия, его основных параметрах и габаритных размерах.

4. Технический проект. Цель технического проекта – выработка окончательных технических решений по схеме и конструкции, на основании которых можно приступить к выполнению комплекта рабочей документации. Для этого на этапе технического проекта производят полный расчет принципиальной схемы, разбивку изделия на блоки и субблоки, делают чертежи и изготавливают по ним конструктивный макет, который является прообразом будущего изделия. Этот макет подвергают всесторонним испытаниям, по результатам которых вносят необходимые исправления в схему и конструкцию изделия.

5. После утверждения технического проекта заказчиком приступают к разработке *рабочей КД* (*РКД*) *опытного образца* *(опытной партии)*.

6. Опытный образец. По РКД производят изготовление опытных образцов, которые разработчик подвергает испытаниям на соответствие всем требованиям технического задания (заводские испытания). По результатам испытаний вносят коррекцию в рабочую документацию и ей *присваивают литеру О*. Положительные результаты заводских испытаний служат основанием для предъявления образцов на государственные испытания, которые проводит государственная комиссия. По замечаниям, сделанным в результате государственных испытаний, в конструкторскую документацию вносят коррекцию и документации присваивается *литера О1*.

7. Опытная партия. Производят то же, что и на опытный образец. После этого документацию на изделие передают в соответствующие производственные структуры для *подготовки серийного производства*. При этом разрабатывают технологические процессы, конструируют и изготавливают инструмент, приспособления и нестандартную измерительную аппаратуру. По оснащенному таким образом технологическому процессу выпускают *установочную серию изделия*.

8. Установочная партия. По результатам выпуска и испытаний установочной серии производят корректировку КД, технологического процесса и изготовленного оборудования, а конструкторской документации присваивают *литеру А*. После этого изготавливают и испытывают *головную партию*.

9. Головная партия. По результатам испытания головной партии корректируют КД и присваивают ей *литеру Б*.

10. Серийное производство.

11. Эксплуатация до выработки ресурса. Транспортировка, применение, хранение изделия.

12. Утилизация.

Для проведения испытаний разрабатывают программу и методику испытаний, которая является основой для разработки технических условий.

Технические условия (ТУ) – документ, содержащий потребительские (эксплуатационные) показатели изделия и методы контроля над его качеством. ТУ должны содержать вводную часть и разделы, которые располагают в следующей последовательности:

а) технические требования;

б) правила приемки;

в) методы контроля;

г) транспортировка и хранение;

д) указания по эксплуатации;

е) гарантии поставщика.

## Общая характеристика методов проектирования

В процессе проектирования используются следующие методы:

− математические;

− экспериментальные;

− эвристические.

При применении *математических методов* совокупность исходных данных  формулируется математически, т. е. составляется математическое описание условий работы системы , ограничений  на структуру системы и значения ее параметров, состав вектора качества  и критерий качества системы . После этого определяют математически целевые функции, представляющие собой зависимости частных показателей качества  от структуры системы *S* и значений ее параметров при заданных условиях . Для полученного таким образом описания отыскивают математическими методами анализа и синтеза алгоритмы работы и параметры системы, удовлетворяющие выбранному критерию качества. При этом широко используют ЭВМ следующими способами:

* расчетами;
* математическим моделированием;
* автоматизированным проектированием.

К *расчетам* относят вычисления по заранее полученным формулам при фиксированных значениях входящих в них параметров (обычный расчет) и при вариациях параметров для нахождения экстремума функции одной или нескольких переменных (линейное и нелинейное программирование).

При *математическом моделировании* исходные уравнения, описывающие поведение системы и все приложенные к ней воздействия и сигналы, приводят к алгоритмам, приемлемым для расчетов на ЭВМ. Эти исходные алгоритмы, а также все ограничения  и критерии качества  вводят в ЭВМ. На выходе ЭВМ выдаются результаты анализа системы, позволяющие оптимизировать ее параметры.

*Автоматизированное проектирование* проводится на базе ЭВМ и предназначено для синтеза оптимальной структуры системы, включая определение оптимальных значений ее параметров. При автоматизированном проектировании ЭВМ выдает результаты в форме готовой технической документации в виде таблиц, чертежей и других документов. В настоящее время автоматизированное проектирование применяется в основном при конструировании и разработке технологии изготовления в меньшей степени на схемотехническом уровне, за исключением интегральных микросхем, цифровых и СВЧ устройств, и в еще меньшей степени на системотехническом уровне. Математическое моделирование часто рассматривается как составная часть процесса автоматизированного проектирования.

Математические методы проектирования предполагают наличие определенного математического описания, которое требует экспериментальной проверки и существует не на всех этапах проектирования. Поэтому математические методы дополняются экспериментальными и эвристическими методами проектирования.

Различают следующие основные виды *экспериментальных исследований*:

* полунатурное моделирование;
* лабораторные исследования;
* полевые испытания;
* летные испытания;
* пробные пуски;
* испытания в эксплуатации.

Полунатурное моделирование отличается от математического моделирования тем, что часть звеньев включают в состав модели в виде натурных макетов, а не моделируют на ЭВМ. Под лабораторными исследованиями понимают исследования натурных макетов в лабораторных условиях с имитацией входных сигналов и помех. Таким образом, полунатурное моделирование и лабораторные исследования являются экспериментально-теоретическими. При полевых испытаниях аппаратуру испытывают не в лабораториях, а в полевых условиях. При этом заменяют по возможности имитированные сигналы реальными. При летных испытаниях бортовая часть проектируемой РЭС размещается на самолете. При испытаниях ракет и космических аппаратов полностью экспериментальными являются пробные пуски и испытания в процессе эксплуатации.

*Эвристический метод проектирования* опирается на имеющийся опыт разработки, результаты теоретических и экспериментальных исследований в процессе проектирования и используется в следующих случаях:

− при выборе и формулировке цели проектирования;

− при выборе физических принципов действия системы;

− при обосновании математических моделей системы и воздействий на нее;

− при выборе методов математического и экспериментального моделирования;

− при выборе элементной базы;

− при трактовке результатов моделирования и принятии окончательных решений.

В процессе проектирования решаются три основных задачи:

1. Синтез оптимальных алгоритмов преобразования сигналов и информации.

2. Выбор оптимальных значений параметров системы (длины волны, занимаемой полосы частот, мощности излучения и др.).

3. Сравнение различных вариантов построения системы с целью выбора наилучшего варианта.

Задачу 1 часто называют синтезом структуры (алгоритмов), задачу 2 – оптимизацией параметров (параметрической оптимизацией), а задачу 3 – дискретным выбором системы (варианта ее построения). Обычно решение задач 1 и 2 предшествует дискретному выбору системы, так как перед сравнением вариантов системы нужно предварительно найти для каждого из вариантов оптимальную структуру и значения параметров. Однако проводить синтез структуры и оптимизацию параметров для большого числа вариантов затруднительно. Поэтому иногда сначала на основе имеющихся априорных данных исключают из рассмотрения часть заведомо неподходящих вариантов. В этом случае последовательность решения задач 1, 2 и 3 в процессе проектирования изменяется.

## Процесс проектирования систем. Способы проектирования. Итерационный характер проектирования

Процесс проектирования делится на этапы, которые, в свою очередь, делятся на процедуры и операции.

*Проектная процедура* – формализованная совокупность действий, выполнение которых оканчивается проектным решением. *Проектное решение* – промежуточное или окончательное описание объекта проектирования, необходимое и достаточное для рассмотрения и определения дальнейшего направления или окончания проектирования.

*Проектная операция* – действие или совокупность действий, составляющих часть проектной процедуры, алгоритм которых остается неизменным для ряда проектных процедур.

*Этап проектирования* – условно выделенная часть процесса проектирования, состоящая из одной или нескольких проектных процедур. Обычно данный этап включает процедуры, связанные с получением описаний в рамках одного аспекта и одного или нескольких соседних уровней абстрагирования.

В зависимости от того, в какой последовательности выполняют процедуры и этапы, различают два способа проектирования (рис. 1.3). *Нисходящее проектирование* имеет место, если выполнение процедур на высших иерархических уровнях предшествует выполнению процедур, относящихся к более низким иерархическим уровням. *Восходящее проектирование* характеризуется противоположной последовательностью выполнения процедур и этапов.

Нисходящее проектирование начинается с анализа проблемы, формирования целей создания системы и критериев ее оценки, далее идет порождение конкурентоспособных вариантов, их оценка и выбор наилучшего, а заканчивается *концептуальное проектирование* формулированием ТЗ на техническое проектирование системы. Процесс *технического проектирования* отличается от концептуального проектирования тем, что начинается с анализа ТЗ на данную систему, а заканчивается разработкой частных ТЗ на подсистемы. Следовательно, при техническом проектировании имеют дело сразу с тремя уровнями иерархии системы: надсистема, система и подсистема. Эта схема отражает принцип проектирования «сверху вниз», когда более крупная система (задача) разбивается на ряд более мелких, объем которых может охватить один человек. Таким образом, процесс проектирования разбивается на уровни, соответствующие уровням иерархии системы, и называется блочно-иерархическим. Этот процесс является итеративным, причем циклы существуют как внутри каждого уровня, так и между ними.



Рис. 1.3. Процесс проектирования систем

Серьезным недостатком блочно-иерархического проектирования является то, что на более высоких уровнях принимаются решения без полного знания более низких уровней (их еще предстоит рассмотреть). Здесь исходят из предположения о будущих характеристиках, что не всегда оправдывается.

При восходящем проектировании составные части системы после их приобретения или проектирования и последующего изготовления поступают на стыковку и отладку системы, а затем – на испытания (стендовые, полигонные и др.). Если испытания заканчиваются успешно, то готовая система как компонент поступает на вышележащий уровень. Значит, проектирование испытаний (разработка программы, тестов, а часто и аппаратуры для испытаний) является неотъемлемой частью процессов обеих проектных стадий.

Восходящее проектирование обычно применяется на тех иерархических уровнях, на которых проектируются типовые объекты, предназначенные для использования в качестве элементов во многих объектах на более высоких иерархических уровнях (серийные микросхемы, стандартные ячейки и т. п.). Нисходящее проектирование охватывает те уровни, на которых проектируются объекты, ориентированные на использование в качестве элементов в одной конкретной системе. На каждом уровне восходящего проектирования ТЗ формируют исходя из прогнозируемых потребностей многих применений на основе мнения экспертов и результатов предварительно выполненных НИР. При нисходящем проектировании формируется ТЗ лишь на систему верхнего уровня. На всех остальных уровнях решается задача преобразования ТЗ системы в ТЗ на элементы.

*Пример 1.* Типичная последовательность этапов нисходящего проектирования РЭС:

* системотехническое проектирование (анализ тактико-технических требований на проектируемую РЭС, определение основных принципов функционирования, разработка структурных схем);
* схемотехническое проектирование (разработка функциональных и принципиальных схем);
* конструкторское проектирование (выбор формы, компоновка и размещение конструктивов, трассировка межсоединений, изготовление конструкторской документации);
* технологическое проектирование (разработка маршрутной и операционной технологий, выбор оснастки, определение технологических баз).

*Пример 2.* Типичная последовательность восходящего проектирования БИС.

* приборно-технологическое проектирование (выбор базовой технологии, расчет диффузионного профиля, выбор топологии компонентов);
* схемотехническое проектирование (синтез принципиальной электрической схемы, оптимизация параметров элементов);
* функционально-логическое проектирование (синтез комбинационных схем, реализация памяти, синтез контролирующих и диагностических тестов, выявление критических состязаний сигналов);
* конструкторско-топологическое проектирование (размещение элементов, трассировка межсоединений).

Проектированию РЭС свойственен итерационный характер, при котором приближение к окончательным результатам осуществляется путем многократного выполнения одной и той же последовательности процедур с корректировкой исходных для этой последовательности данных. Итерации могут охватывать различные части процесса проектирования, включающие как несколько операций, так и несколько этапов. Для уточнения итерационного характера проектирования РЭС проведем классификацию проектных процедур. В *процедурах синтеза* разрабатываются, а в *процедурах анализа* оцениваются варианты построения объектов.

*Одновариантный анализ* заключается в определении вектора выходных параметров при заданной структуре системы, значений внутренних параметров и входных внешних параметров. Структура системы задана, если заданы перечень типов элементов и способ их связи друг с другом в составе системы. По известной структуре, значениям внутренних параметров и входным внешним параметрам создаются либо физические модели (макет), либо математические и по результатам исследования модели оцениваются выходные параметры системы. В этом случае говорят, что анализ выполнен методом *моделирования*. Приемлемость полученных значений выходных параметров определяется их сопоставлением со значениями технических требований, указанных в ТЗ. Анализ может выполняться методом статических характеристик, динамических характеристик, в частотной области, стационарных режимов колебаний, устойчивости.

*Многовариантный анализ* заключается в определении изменений выходных параметров при заданных изменениях значений внутренних параметров и входных внешних параметров. Разновидностями процедур многовариантного анализа являются: *анализ чувствительности* – оценка влияния внутренних и внешних параметров на выходные, сводящиеся к расчету коэффициентов чувствительности; статистический анализ – оценка закона и (или) числовых характеристик распределения выходных параметров при заданных статистических характеристиках внутренних параметров.

Различают процедуры структурного синтеза и параметрического синтеза. При *структурном синтезе* определяется структура РЭС. При *параметрическом синтезе* определяются численные значения параметров элементов при заданных структуре объекта и диапазоне возможного изменения внешних переменных. Если при этом ставится цель достижения экстремума некоторой целевой функции, то имеет место процедура параметрической оптимизации. При оптимизации параметров определяются номинальные значения внутренних параметров и допуски на них.

В большинстве случаев процедуры синтеза и анализа используются совместно (рис. 1.4) в процессе итерационного проектирования. После формулировки ТЗ и выбора (синтеза) первоначального варианта структуры и значений параметров элементов следует анализ объекта. Если целью анализа является установление соответствия синтезируемой структуры исходному ТЗ, то анализ называется *верификацией* проекта. Различают верификацию структурную и параметрическую. При структурной верификации проверяется соответствие структур объекта, представленных двумя различными описаниями. При параметрической верификации устанавливается соответствие областей работоспособности двух сравниваемых вариантов объекта.



Рис. 1.4. Итерационный характер проектирования

Обычно по результатам анализа организуется итерационный процесс улучшения первоначального варианта путем изменения численных значений параметров элементов. Этот процесс может быть представлен как решение задачи параметрической оптимизации. Если по результатам оптимизации требования ТЗ не выполнены, предпринимается попытка улучшить результаты внесением структурных изменений. Если и в этом случае не удается получить удовлетворительные результаты, то ставится вопрос о корректировке ТЗ.

Полный и тщательный анализ требует больших материальных и временных затрат. Поэтому на первых итерациях выполняют упрощенный анализ. Использовать сложные модели и проводить параметрическую верификацию и всесторонний многовариантный анализ целесообразно лишь на завершающих стадиях.

Большие затраты на анализ характерны для функционального проектирования или задач разработки принципиальных электрических схем. Для этих задач обычно применяют эвристические методы синтеза структуры с перебором малого числа вариантов. Основные усилия затрачиваются на выполнение многовариантного анализа и оптимизации.

## Системный подход при проектировании

Оптимальное решение задачи проектирования возможно лишь на основе всестороннего, целостного рассмотрения проектируемой системы и ее развития (изменения) в процессе взаимодействия с окружающей средой. Такой подход называется *системным*.

В основе системного подхода заложены следующие принципы:

1. Учет всех этапов жизненного цикла разрабатываемой системы. Прогрессивная по принципам построения система может оказаться нереализованной из-за недостаточной технологичности ее производства.

2. Учет истории и перспектив развития систем данного класса. Ранее непригодные системы могут стать перспективными за счет появления новой элементной базы. Кроме того, надо избегать быстрого «морального» старения разрабатываемой РЭС и учитывать прогноз ее развития.

3. Учет взаимодействия системы с внешней средой:

* взаимодействие с природой и обществом в целом (экология, экономика и др.);
* обмен информацией (получение и выдача);
* обмен энергией и веществом;
* внешние воздействия (температура, влажность, давление и др.);
* взаимодействие с другими системами;
* воздействие помехи.

4. Учет взаимодействий внутри системы:

* функциональное;
* конструктивное;
* динамическое;
* информационное;
* энергетическое и др.

5. Учет взаимодействия между элементной базой и системотехникой. Развитие элементной базы вызывает развитие системотехники.

6. Учет возможности изменения исходных данных и решаемой задачи в процессе проектирования, производства и эксплуатации. При этом существует необходимость:

− вариации исходных данных в процессе проектирования для оценки степени их критичности;

− обеспечение универсальности применения проектируемой системы.

7. Выделение главных показателей качества, подлежащих улучшению в первую очередь (точность, помехоустойчивость, надежность, пропускная способность, масса и стоимость).

8. Сочетание принципов композиции, декомпозиции и иерархии. На этапе композиции блок, состоящий из отдельных элементов, рассматривают как единое целое. Однако сложную систему нельзя рассматривать как один блок и поэтому ее разбивают на ряд подсистем, т. е. производят декомпозицию. При декомпозиции важно правильно определить критерии качества подсистем исходя из общего критерия качества.

9. Вскрытие основных технических противоречий, препятствующих улучшению качества системы, и нахождение приемов их преодоления.

10. Правильное сочетание различных методов проектирования: математического, эвристического и экспериментального. В рамках математического метода правильным является сочетание аналитических методов и использования ЭВМ.

Можно выделить следующие важнейшие принципы системного подхода к проектированию:

1) каждая система рассматривается как часть (подсистема) некоторой более общей системы;

2) характеристики подсистемы определяются требованиями, предъявляемыми к системе, стоящей на более высокой ступени иерархии;

3) при проектировании подсистемы должны учитываться взаимодействие ее с другими подсистемами, стоящими на той же ступени иерархической лестницы, а также обстановка, в которой работает система.

При использовании системного подхода (рис. 1.5) в первую очередь необходимо изучить обстановку, в которой будет работать РЭС, исследовать задачи, поставленные перед РЭС, обеспечить взаимодействие с другими средствами. На основе проведенного изучения формулируются тактико-технические требования (ТТТ), которым должна удовлетворять проектируемая система; в самых общих чертах намечается структура РЭС. Проектирование, выполненное на первом этапе по описанной схеме с применением системного подхода, является *внешним проектированием.* На втором этапе – этапе *внутреннего проектирования –* уточняется структура и производится выбор параметров подсистем.



Рис. 1.5. Системный подход в проектировании

На втором этапе может осуществляться оптимизация РЭС, которая сводится к вычислению с помощью строгих математических операций оптимальных значений параметров подсистем. При такой оптимизации последовательно соблюдаются требования системного подхода: из тактико-технических требований к системе вытекают требования к показателям основных устройств, составляющих систему.

Таким образом, в соответствии с системным подходом проектирование должно вестись от более общих вопросов к менее общим, или сверху вниз.

# ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РЭС И ПУТИ ИХ УЛУЧШЕНИЯ

## Точность РЭС

### *Показатели точности РЭС*

Введем *показатели точности* РЭС. Пусть имеется сообщение или параметр полезного сигнала , который надо воспроизвести с максимальной точностью. Пусть  – результат измерения (воспроизведения) параметра . Текущая ошибка измерения записывается в виде

. (2.1)

Ошибка  в общем случае является случайной величиной. Точность в случае случайных ошибок это, например, тепловые шумы приемников, неточность знания физических законов и физических постоянных можно охарактеризовать средним риском 

, (2.2)

где  – априорная плотность вероятности случайной величины ;

 – условная плотность вероятности измерения  при условии, что имел место параметр ;

 – функция потерь.

Из выражения видно, что средний риск  является математическим ожиданием риска

 . (2.3)

Наиболее часто в качестве функции риска выбирают квадратичную функцию

 . (2.4)

В этом случае средний риск совпадает со средним квадратом ошибки измерения:

 . (2.5)

Наряду со средним риском  (или средним квадратом ошибки  ) важными статистическими характеристиками ошибки  является ее математическое ожидание

 (2.6)

и дисперсия

 . (2.7)

Таким образом, точность измерения иногда характеризуется двумя показателями: математическим ожиданием ошибки и ее дисперсией. Это объясняется тем, что ошибка  в общем случае имеет две составляющие существенно различного характера

, (2.8)

где  – систематическая составляющая ошибки;

 – флуктуационная составляющая ошибки.

Систематической ошибкой  называется такая составляющая ошибки , которая не изменяется при переходе от одного к другому сеансу измерения, либо изменяется по детерминированному закону. В отличие от систематической ошибки флуктуационная составляющая ошибки  является строго случайной (флуктуационной) и имеет нулевое математическое ожидание

 . (2.9)

С учетом изложенного можно сформулировать следующие выводы:

1) точность измерения необходимо характеризовать не одной, а несколькими показателями;

2) в качестве показателей точности используют следующие статистические характеристики: средний риск, средний квадрат ошибки, среднее значение ошибки, дисперсия флуктуационной ошибки.

Если источники ошибок нестационарны, то введенные показатели точности зависят от времени. Если необходимо избежать зависимости от времени, используют максимальное или среднее по времени значение соответствующего показателя точности.

### *Источники ошибок измерения*

По характеру источников ошибки разбивают на следующие группы:

1. ошибки физической неопределенности;
2. методические ошибки;
3. ошибки, вызванные действием помех;
4. аппаратурные ошибки;
5. отказы.

Ошибки *физической неопределенности* вызываются факторами природы, которые разработчик в принципе не в состоянии полностью устранить. К ним относится, например, неточное знание скорости света. К *методическим* относят ошибки, вызванные погрешностями теоретических методов, использованных при проектировании системы. К *помехам* относят: внутренние шумы; паразитные флуктуации сигнала при его распространении; мешающие отражения; атмосферные и космические помехи; индустриальные помехи; непреднамеренные радиопомехи радиостанций; преднамеренные радиопомехи; внутрисистемные помехи. Основными источниками *аппаратурных ошибок* являются: линейные и нелинейные искажения сигналов в трактах прохождения радиоканалов; разброс параметров аппаратуры при ее изготовлении; нестабильность питающих напряжений; изменения температуры, влажности и давления; механические возмущения из-за вибраций, ударов. Отказами называют длительные аномальные ошибки любого происхождения: обрывы, короткие замыкания, старение источников питания, длительное действие мощных помех.

Таким образом, источники ошибок разнообразны по своему происхождению и характеру действия. Поэтому общая теория точности РЭС распадается на четыре составляющие:

− аппаратурную точность (физические неопределенности, методические и аппаратурные ошибки);

− помехозащищенность (помехи);

− электромагнитную совместимость (непреднамеренные помехи, индустриальные и внутрисистемные помехи);

− надежность (отказы).

### *Пути уменьшения ошибок измерения*

Пути ослабления влияния источников ошибок зависят от характера источника, однако все методы повышения точности можно разбить на три основные группы:

−направленные на устранение источников ошибок;

−направленные на ослабление мешающего воздействия источников   
ошибок;

− комбинация методов.

К первой группе методов повышения надежности относят:

1. подавление источников индустриальных помех их экранированием;
2. уменьшение шумовой температуры;
3. ослабление взаимных помех за счет разнесения рабочих частот;
4. повышение скрытности системы для затруднения постановки организованных помех;
5. переход в диапазон сантиметровых и миллиметровых длин волн, где интенсивность непреднамеренных помех резко уменьшается;
6. ослабление влияния температуры путем стабилизации температуры внутри блока;
7. уменьшение числа механических контактов;
8. стабилизация питающих напряжений.

Вторая группа методов повышения точности разнообразна и может включать:

1. применение пространственно-временной обработки для ослабления различных помех;
2. применение принципов компенсации и комлексирования для ослабления аппаратурных ошибок;
3. резервирование аппаратуры;
4. использование обратных связей для уменьшения влияния нестабильностей, линейных и нелинейных искажений;
5. термостатирование блоков;
6. амортизация блоков;
7. экранировка блоков от мешающих воздействий;
8. применение калибровки для уменьшения систематических ошибок;
9. стабилизация частоты передатчиков и гетеродинов приемников.

Основным методом комбинированного действия является переход от аналоговой обработки сигналов к цифровой. В этом случае резко уменьшается влияние нестабильностей трактов приема и передачи и появляется возможность реализации сложных и эффективных алгоритмов помехозащиты. Однако при этом появляются шумы квантования и предъявляются высокие требования к частоте дискретизации обрабатываемых сигналов.

## Помехозащищенность РЭС

### *Общие замечания*

*Помехозащищенность* является характеристикой РЭС, определяющей ее результирующую способность к успешному участию в РЭБ за счет обеспечения требуемой точности и пропускной способности (быстродействия) в условиях действия возможных помех. Иногда помехозащищенность определяют как особенности РЭС, затрудняющие создание и действие помех. Таким образом, помехозащищенность обеспечивается помехоустойчивостью и скрытностью.

*Помехоустойчивость* характеризует свойства РЭС, обеспечивающие сохранение работоспособности системы при действии на нее помех.

*Скрытность* характеризует свойства РЭС, способствующие затруднению обнаружения возможным противником факта функционирования РЭС и определения характеристик излучаемых ею радиосигналов для создания эффективных помех или наведения управляемого оружия.

Если скрытность системы обеспечить не удается, то помехозащищенность РЭС совпадает с ее помехоустойчивостью.

### *Скрытность РЭС*

*Скрытность РЭС* – совокупность свойств системы, затрудняющих ведение противником радиотехнической разведки.

Скрытность РЭС можно подразделить на энергетическую, временную, структурную.

*Энергетическая скрытность* предполагает создание условий, при которых противник встречает затруднения энергетического характера. Для работы РЭС обеспечивается нормальный уровень сигнала, при этом необходимо по возможности уменьшить его для вероятных средств разведки. К мерам по обеспечению энергетической скрытности относятся:

− применение остронаправленных антенн;

− применение высокочувствительных приемников;

− работа с минимальным уровнем сигнала;

− кодирование сигналов, позволяющее производить обработку принятых сигналов по правилам, не известным противнику.

*Временная скрытность* – совокупность мер, затрудняющих обнаружение излучений в силу их кратковременности.

Меры по обеспечению временной скрытности:

− применение импульсных сигналов или других видов кратковременных излучений, особенно моноимпульсных сигналов;

− смена параметров сигнала во время работы.

*Структурная скрытность* – совокупность свойств радиосигнала, затрудняющих извлечение из него информации. При оценке скрытности сигнал считается обнаруженным, принятым без искажений. Преодоление скрытности в данном случае состоит только в расшифровке содержания сообщения.

Энергетическую скрытность удобно определять *по размерам того пространства, в котором создается достаточный для разведки уровень сигнала*. Временная скрытность характеризуется *вероятностью обнаружения сигнала*. Структурная скрытность оценивается *временем, необходимым для расшифровки принятого сигнала* с целью извлечения из него передаваемой информации.

Обычно средства радиотехнической разведки должны обеспечивать обнаружение и измерение параметров радиосигнала. Обнаружение является первым и самым важным шагом радиотехнической разведки. После обнаружения определяют значение несущей частоты сигнала, направление в точку излучения и местоположение передатчика, параметры модуляции, временную структуру сигнала.

*2.2.2.1. Показатели временной скрытности РТС*

Если противник применяет параллельный (мгновенный) поиск по частоте или направлению, то обеспечивается гарантированное обнаружение сигнала РЛС или системы связи при соблюдении энергетических условий. Поэтому далее оценивается временная скрытность (вероятность обнаружения сигнала) при последовательном поиске по частоте или направлению.

**Вероятность обнаружения сигнала при последовательном поиске по частоте**

*Вероятность обнаружения одиночного импульса при последовательном поиске по частоте*. В общем случае при обнаружении сигналов априорных сведений нет, т. е. заранее трудно указать какой-либо параметр сигнала, с помощью которого можно обеспечить гарантированный поиск сигналов. Поэтому устанавливается вероятностный поиск, при этом вероятность обнаружения меньше единицы. Чтобы рассчитать вероятность обнаружения сигнала, надо решить, как определять вероятность его элемента. Элементами прерывистых сигналов могут быть:

− отрезок непрерывного сигнала;

− импульс;

− группа импульсов.

Ограничимся изучением вероятности обнаружения, опираясь только на импульсные сигналы и принимая в качестве элементов импульс и группу импульсов. Для отрезков непрерывных сигналов гарантированный поиск обеспечивается легче, и вероятностный поиск представляет меньший интерес.

Используем геометрическое определение вероятности. Будем считать, что на интервале времени *пТ*п*,* где *п –* целое число, одиночный импульс появляется с вероятностью, равной единице (в противном случае этого можно добиться, увеличив число *п*). Положение импульса на отрезке *пТ*псчитаем равновероятным. Тогда под вероятностью *P*1обнаружения одиночного импульса будем понимать отношение суммы всех благоприятных для обнаружения отрезков  на интервале *пТ*пк длине интервала, т. е.

. (2.10)

При этом считается, что в каждом интервале *Т*п содержится по одному отрезку .

Данное геометрическое определение можно проиллюстрировать с помощью частотно-временной диаграммы (рис. 2.1). Для некоторой частоты *fc* показаны благоприятные для обнаружения отрезки .Если считать, что условия обнаружения в каждом периоде перестройки одинаковы, то формулу (2.10) можно упростить:

 . (2.11)



Рис. 2.1. Частотно-временная диаграмма

В таком случае вероятность *P*1 находят для одиночного периода перестройки. При прямоугольной частотной характеристике приемника  и без учета длительности импульса

, (2.12)

т. е. вероятность обнаружения становится величиной, обратной скважности приемника. С учетом длительности импульса вероятность *P*1 может быть больше и достигает единицы, если будут выполнены условия быстрого поиска импульсов. Иными словами, ось времени в пределах данного периода перестройки становится благоприятной для обнаружения.

*Вероятность обнаружения одиночной группы импульсов при последовательном поиске по частоте*.Используем приведенное геометрическое определение вероятности. Следует учесть, что одиночная группа импульсов более протяженна во времени, и иногда достаточно принимать только ее часть. Используем частотно-временную диаграмму, приведенную на рис.2.2, и попытаемся с его помощью найти значение . Для этого «переместим» группу вдоль оси времени слева направо и зафиксируем те крайние положения, при которых еще возможен прием *b* импульсов, необходимых для срабатывания последующих устройств. Расстояние между крайними положениями принимаем за отрезок . Определим  следующим образом:

 . (2.13)

Тогда вероятность обнаружения одиночной группы

 . (2.14)

При больших  вероятность  может достигнуть единицы (но не больше), т. е. будет осуществлен быстрый поиск групп импульсов.



Рис. 2.2. Частотно-временная диаграмма

*Вероятность обнаружения импульсного сигнала*.Пусть некоторый сигнал содержит *i* одиночных случайно расположенных импульсов. Вероятность обнаружения одиночного импульса равна *Р*1*.* Вероятность обнаружения сигнала найдем известным из теории вероятностей приемом. Последовательно определим вероятность необнаружения одиночного импульса *Q*1 = 1 – *Р*1, вероятность необнаружения всех *i* импульсов  и, наконец, вероятность

 , (2.15)

которая является вероятностью обнаружения хотя бы одного импульса из сигнала, состоящего из *i* импульсов.

Таким образом, высокой вероятности обнаружения можно достигнуть прежде всего за счет увеличения *Р*1, при малых *Р*1 требуются очень протяженные сигналы.

Для сигналов с регулярной структурой, в которых расстояние между импульсами постоянно, средний результат будет характеризоваться вероятностью обнаружения (как и для сигналов с нерегулярной структурой), т. е. можно пользоваться зависимостями, приведенными на рис. 2.3. Однако в отдельных случаях возникают явления полного или частичного синхронизма между сигналом, имеющим периодическую структуру, и перестройкой приемника. В результате вероятность обнаружения сигналов оказывается существенно ниже средней. Избежать таких явлений можно изменением периода перестройки в процессе работы, что, конечно, усложняет работу и ведет к дополнительным потерям в вероятности обнаружения.



Рис. 2.3. Вероятность обнаружения импульсного сигнала

Для сигнала, состоящего из *i* групп импульсов, формула (2.15) принимает вид

. (2.16)

**Вероятность обнаружения сигнала при последовательном поиске по направлению**

При поиске по направлению прерывистых сигналов, как и при поиске по частоте, следует различать *гарантированный* и *вероятностный поиски.* Гарантированные виды поиска надежно устанавливаются при наличии некоторых данных о сигналах. В большинстве случаев таких данных нет, поэтому выполняется вероятностный поиск. Для расчета вероятности обнаружения требуется знать вероятность обнаружения некоторого элемента сигнала, например вероятность *Р*1гр обнаружения одиночной группы импульсов. Методика определения *Р*1гр такая же, как и при вероятностном поиске прерывистых сигналов – используется формула, аналогичная (2.10), куда подставляется вместо периода *Т*пперестройки приемника по частоте период *Т*вр вращения поисковой антенны.

Вероятность обнаружения сигнала, состоящего из *i* групп, вычисляется по известной формуле *Р =* 1 – (1 – *Р*1гр)*i*. При разведке РЛС кругового обзора *i –* число периодов вращения антенны. С другой стороны, *i –* количество групп, необходимых для обнаружения сигналов с вероятностью *Р*. Если задаться вероятностью *Р = Р*з, то можно определить время, необходимое для достижения такой вероятности:

 (2.17)

*2.2.2.2. Показатели энергетической скрытности РЭС*

**Энергетическая скрытность средств непосредственной радиосвязи**

До сих пор рассматривались вопросы временной скрытности, т. е. обнаружения и измерения параметров в условиях достаточно большой интенсивности сигналов. Чем больше априорных сведений, тем легче осуществляется разведка (вплоть до гарантированного преодоления временной скрытности). Вместе с тем не всегда удается принять сигнал РЭС из-за недостатка его энергии в точке разведки, т. е. РЭС имеет энергетическую скрытность. Попытаемся сделать количественную оценку такой скрытности

Обратимся к схеме (рис. 2.4), упрощенно отображающей обстановку, в которой работает РТС непосредственной радиосвязи. Элементарная радиотехническая система представлена передающей и приемной сторонами, разнесенными на дальность *R*. **Передающая сторона** характеризуется мощностью излучения *Р*и, коэффициентом направленного действия *G*пep и нормированной, снятой по мощности диаграммой направленности антенны *у* (φ, υ). Для **приемного конца** важно знать чувствительность приемника *Р*0, КНД антенны *G*пp и диаграмму направленности *у* (ψ, ε).



Рис. 2.4. Обстановка работы РТС непосредственной радиосвязи

На произвольном расстоянии *D* расположена **станция обнаружения** (СО), характеризующаяся чувствительностью приемника *Р*0со, КНД антенны *G*сo и диаграммой *у* (θ, ν). На рис. 2.4 показана схема, в которой в одной плоскости отмечены направления передачи сигнала φс приема, передачи в сторону СО (φсо) и приема СО (θс).

Запишем выражения для максимальных дальностей:

– дальность действия РТС в произвольном направлении φс, εс:

; (2.18)

– дальность действия СО в произвольном направлении:

. (2.19)

Однако радиосистема работает при согласованных диаграммах направленности. Считаем также, что антенна СО правильно ориентирована: т. е. *у* (φс, υс) = 1, *у* (ψс, εс) = 1, *у* (θс, νс) = 1.

Тогда

 (2.20)

или

. (2.21)

где у'(φоб, υоб) **–** нормированная диаграмма направленности передающей антенны по напряженности поля.

Получено выражение, характеризующее границы области обнаружения РТС. Форма этой области совпадает с диаграммой направленности передающей антенны РТС по напряженности поля и показана на рис. 2.5.



Рис. 2.5. К определению энергетической скрытности РТС

Область обнаружения на рис. 2.5 (заштрихована) может служить мерой энергетической скрытности. Ее можно характеризовать рядом параметров. Наиболее существенными являются параметры *D*СОmax и φ0. Важен также средний уровень боковых лепестков области обнаружения *D*бок. ср.

**Энергетическая скрытность радиолокационных средств**

Рассмотрим упрощенную модель электромагнитной обстановки (рис. 2.6), приняв во внимание только РЛС, работающую по обнаружению цели, и станцию обнаружения излучений РЛС.

**Параметры РЛС** следующие: *Р*и – импульсная мощность излучения; *Р*0 – пороговая мощность приемника; *G*РЛС – КНД приемно-передающей антенны; *у*(φ, υ) – нормированная диаграмма направленности этой антенны, снятая по мощности.

**Аэродинамическая цель характеризуется** эффективной площадью рассеяния (ЭПР) σц.



Рис. 2.6. К определению энергетической скрытности РЛС

**Станция обнаружения** имеет параметры: *Р*0СО – пороговая мощность приема; *G*СО – коэффициент направленного действия антенны; *y*(θ, ν) – нормированная диаграмма направленности антенны, снятая по мощности.

Запишем формулы для дальности действия РЛС и СО в свободном пространстве. Максимальная дальность *D*maxобнаружения цели функционально связана с другими параметрами РЛС и цели соотношением

. (2.22)

Максимальная дальность *D*o обнаружения сигналов РЛС в произвольном направлении может быть записана в виде:

. (2.23)

Пусть *у* (φс, υс) = 1, *у* (θоб, νоб) = 1, тогда

. (2.24)

Запишем уравнение для границ области обнаружения

. (2.25)

Сравнение (2.25) и (2.21) показывает их сходство, т. е. область обнаружения имеет форму диаграммы направленности передающей антенны РЛС по напряженности поля. Однако величина дополнительного множителя , в котором под корнем содержится отношение площади сферы радиусом *R*maxк эффективной площади рассеяния цели – очень большое число. Поэтому можно сделать общее заключение, что РЛС не скрытны в энергетическом отношении.

В наземных условиях некоторые дальности обнаружения могут быть недоступны из-за кривизны Земли. Поэтому область обнаружения для РЛС в условиях, когда кривизна Земли имеет значение, ограничивают предельным значением *D*пред.С учетом *рефракции* (нелинейного распространения электромагнитных волн в атмосфере) предельная дальность

, (2.26)

где *D*пред измеряется в км;

*h*1, *h*2 – в метрах;

*k* = 4,08 для радиоволн с λ > 1 см;

*k* = 3,82 – для световых волн.

Таким образом, область обнаружения оказывается ограниченной. На рис. 2.7 графически изображена область обнаружения в соответствии с (2.25) и с учетом (2.26) для одной плоскости.

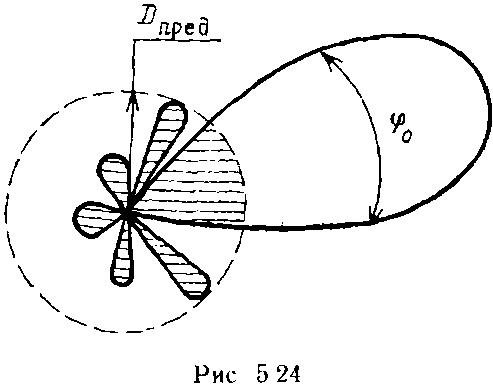


Рис. 2.7. К определению коэффициента заполненности области обнаружения

Показатели *D*COmaxи φ0 являются важнейшими показателями области обнаружения, хотя оценка по боковым лепесткам приобретает первостепенное значение. При этом удобным показателем может быть *коэффициент заполненности области обнаружения* (это отношение заштрихованной части рисунка к площади круга радиусом *D*пред). Хорошим показателем остается средний уровень боковых лепестков.

Оценка скрытности по области обнаружения отражает энергетические соотношения, но не содержит информации о временных возможностях обеспечения скрытности. Именно РЛС позволяют обеспечить временную скрытность по следующим соображениям: обычно РЛС отличаются невысокой информативностью, поэтому имеются значительные резервы по времени передачи, передатчик и приемник располагаются в одной точке пространства, что дает возможность в любом порядке маневрировать параметрами сигнала, затрудняя ведение разведки. Эти меры повышения скрытности немедленно отражаются на характеристиках разведустройств. Преодоление временной скрытности влечет за собой резкое снижение чувствительности приема, следовательно, область обнаружения сжимается (несмотря на наличие отмеченного большого множителя).

*2.2.2.3. Способы обеспечения скрытности РЭС*

Скрытность РЭС может обеспечиваться активными и пассивными способами. Активные способы сводятся к радиомаскировке, т. е. излучению дополнительных ложных сигналов, настолько близких к основным рабочим радиосигналам, чтобы противник не мог отличить ложные сигналы от рабочих. Пассивные способы должны обеспечить скрытность РЭС даже в условиях отсутствия радиомаскировки.

Способами обеспечения пассивной скрытности являются:

– использование сложных сигналов неизвестной структуры для противника;

– снижение средней мощности передатчика при повышении чувствительности приемника;

– выбор длины волны с распространением только в зоне прямой видимости;

– формирование диаграммы направленности с малым уровнем боковых лепестков.

### *Помехоустойчивость РЭС*

*Помехоустойчивость* характеризует свойства РЭС, обеспечивающие сохранение работоспособности системы при действии на нее помех.

В качестве показателей помехоустойчивости используются показатели точности: средний риск, средний квадрат ошибки, дисперсия ошибки, математическое ожидание ошибки. При этом задача проектирования систем помехозащиты может формулироваться следующим образом: при заданных видах и характеристиках помех обеспечить заданные показатели точности.

*2.2.3.1 Энергетическая оценка помехозащищенности*

**Энергетическая оценка помехозащищенности систем непосредственной радиосвязи (СНР)**

Наметим некоторую электромагнитную обстановку, т. е. выберем модель для исследования. Элементарная радиолиния СНР состоит из передающего и приемного концов (ПРД и ПРМ), разнесенных на расстояние *R.* На произвольном расстоянии *D* располагается система радиопротиводействия, важнейшей частью которой является передатчик помех ПП (рис. 2.8).



Рис. 2.8. Модель ЭМО системы непосредственной связи:

ПРД – передатчик; ПРМ – приемник; ПП – передатчик помех

Приведем основные характеристики средств:

* 1. Передатчика СНР: *Р*и – мощность излучения; *G*и – КНД излучающей антенны; *y*(φ, υ) – диаграмма направленности излучающей антенны, нормированная, снятая по мощности; φс – направление на приемную часть радиолинии;
  2. Приемника СНР: *Р*0 – минимальная мощность принимаемого сигнала; *G*прм – КНД приемной антенны; *у* (ψ, ε) – диаграмма направленности приемной антенны; ψс, ψп – направления прихода сигнала и помехи;
  3. Передатчика помех: *Р*пп – мощность помехи; *G*пп – КНД передающей антенны; *y*(θ, ν) – диаграмма направленности передающей антенны; θп – направление на приемник.

Мощность сигнала на входе приемника СНР в идеальных условиях распространения рассчитывается по формуле

. (2.27)

Аналогичное выражение запишем для мощности помехи на входе приемника СНР

. (2.28)

Учитывая поляризационные и частотные возможности помехозащиты, а также необходимое превышение уровня помехи над сигналом на входе детектора ПРМ, запишем условие подавления СНР

. (2.29)

Подставляя (2.27) и (2.28) в (2.29), а также принимая допущения *y*(φс, υс)=l, *у* (ψс, εс) = 1, *y*(θп, νп) = 1, получаем

. (2.30)

Выполним некоторые дополнительные преобразования. Отношение *G*и/*G*ПП = *k*н – коэффициент пространственной селекции (по направлению). Если считать, что *Р*и и *Р*ПП – максимальные мощности; *q*СНР, *q*ПП –скважности соответственно сигнала и помехи, *Р*СНРср, *Р*ППср – средние мощности излучения, то получим:

, (2.31)

где *k*в – коэффициент временной селекции;

Ц –цена помехи.

Введем обозначения: *k*з = *k*пол *k*ч *k*под *k*н *k*в – коэффициент, показывающий, во сколько раз надо увеличить дополнительно мощность помехи, чтобы преодолеть все виды селекции в РПУ; СНР – коэффициент заградительности;  – нормированная диаграмма направленности приемной антенны СНР, снятая по напряженности поля.

Условие подавления перепишем в виде

. (2.32)

Соотношение описывает область подавления: все точки пространства, удовлетворяющие (2.32), обладают тем свойством, что нахождение ПП в любой из них соответствует условию подавления (2.29). По форме область подавления повторяет диаграмму направленности приемной антенны по напряженности поля. Область подавления можно считать энергетической характеристикой помехозащищенности РТС. Ее размеры – количественные параметры помехозащищенности. Наибольшее значение из таких параметров может иметь максимальная дальность подавления, соответствующая максимуму диаграммы направленности приемной антенны .

Важны также угловые размеры главного лепестка и средний уровень боковых дальностей *D*бок.Отметим, что оценка помехозащищенности по области подавления учитывает показатели помехоустойчивости и скрытности, отражающиеся главным образом на численном значении *k*з.

Действительно, при заданных возможностях селекции (при данной помехоустойчивости) значение *k*з будет тем больше, чем хуже результаты наведения помехи (чем больше ошибки разведприемника в определении параметров сигнала), т. е. чем выше скрытность, тем меньше область подавления. Аналогично при заданной скрытности область подавления зависит от показателей помехоустойчивости: чем выше уровень селекции, тем меньше знаменатели коэффициентов селекции, тем больше *k*з,а следовательно, тем меньше область подавления.

Так, улучшение скрытности и помехоустойчивости непосредственно ведет к улучшению помехозащищенности, которая, как видно из (2.32),не сводится к помехоустойчивости и скрытности, а учитывает условия использования средств, т. е. зависит от *R*, φп, εп – пространственных характеристик обстановки. Поэтому помехозащищенность является самостоятельным показателем РТС, характеризующим возможности участия последней в радиоэлектронной борьбе.

**Энергетическая оценка помехозащищенности радиолокационных   
систем**

Радиолокационные средства существенно отличаются от СНР именно в энергетическом отношении. Модель радиообстановки для одной плоскости представлена на рис. 2.9. Радиолокационная система производит обнаружение цели, отстоящей от нее на дальности *R*. Передатчик помех отстоит от РЛС на произвольном расстоянии *D*.Обеспечивается измерение параметров сигнала РЛС, наведение помехи и ее излучение.

Приведем основные характеристики элементов модели:

1. РЛС: *Р*и – мощность передатчика; *G*РЛС – КНД антенны; *y*(φ, υ) – диаграмма направленности антенны РЛС, нормированная, снятая по мощности; φс, φп – направления соответственно на цель и ПП;
2. Цель: σц – эффективная площадь рассеяния цели;
3. Передатчика помех: *Р*пп – мощность; *G*пп – КНД передающей антенны; *y*(θ, ν) – нормированная диаграмма направленности по мощности излучающей антенны; θп – направление на РЛС.



Рис. 2.9. Модель ЭМО РЛС:

ПП – передатчик помех

Для свободного пространства можно записать мощность сигнала на входе приемника РЛС, использующей одну и ту же антенну для передачи и приема:

. (2.33)

Аналогичное выражение запишем для мощности помехи:

. (2.34)

Сопоставляя (2.33) и (2.34) запишем условие подавления приемника РЛС:

. (2.35)

Произведем упрощения *y*(φс, υс) = l, *y*(θп, νп) = 1, считая, что длина волны λ одинакова для сигнала и помехи. Соотношение (2.35) будет отображать связь между энергетическими и пространственными характеристиками РЛС и ПП. Воспользовавшись обозначениями, показанными ранее, приведем условие подавления к выражению для области подавления РЛС

. (2.36)

Формальное сопоставление (2.36) и (2.32) показывает, что область подавления РЛС в ****** раз больше, чем в СНР, что позволяет сделать предварительный вывод об энергетической нескрытности РЛС. Указанный множитель очень велик: под корнем содержится отношение площади сферы, описанной радиусом *R*,к эффективной площади рассеяния цели.

Помехозащищенность РЛС оценивается по параметрам области подавления. Нетрудно заметить, что линейные размеры области подавления могут быть большими величинами. В условиях приземной радиолокации надо считаться с влиянием кривизны Земли, см. рис. 2.10.

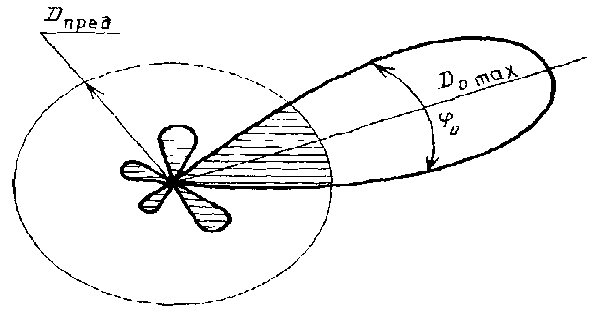


Рис. 2.10. Область подавления РЛС

Роль боковых лепестков при энергетической оценке помехозащищенности РЛС по сравнению с СНР существенно выше.

В частном случае самозащиты цели с помощью активных помех, т. е. при *R = D*,*y*(φп, υп) = 1, соотношение (2.36) преобразуем к виду

. (2.37)

Из (2.37) следует, что для этого случая оценка помехозащищенности минимальной дальности подавления .

Соотношение (2.37) кажется парадоксальным: чем ближе ПП к РЛС, тем труднее подавление. Однако дело здесь в том, что условие подавления определено отношением уровня помехи и сигнала в приемнике РЛС, а эти уровни имеют различные законы изменения в зависимости от дальности. На рис. 2.11 графически изображены обе части условия подавления (2.35) для рассматриваемого случая установки ПП на цели для самозащиты. Точка пересечения кривых имеет абсциссу *R*min (слева область неподавления), подавление имеет место для *R* ≥ *R*min.



Рис. 2.11. Подавление РЛС для случая установки ПП на цели

Низкая помехозащищенность РЛС по энергетической оценке не позволяет утверждать, что РЛС не могут быть помехозащищенными. Для РЛС меры повышения временной скрытности более доступны, чем для СНР.

*2.2.3.2. Способы обеспечения помехоустойчивости*

Изучение прохождения помех через цепи радиоприемного устройства показывает, что основная мера повышения помехоустойчивости – увеличение селективности, т. е. коэффициентов селекции повышает относительный уровень мощности передатчика радиопомех, приводящей к подавлению полезного сигнала.

Эффективное средство борьбы с активными помехами заключается в применении сложных сигналов, при которых возможно почти полное исключение действия сосредоточенных по спектру или по времени радиопомех.

Адаптивные системы с обратной связью имеют также повышенные показатели помехоустойчивости, т. е. способны противостоять помехам за счет повторения сообщений.

Нетрудно заметить, что большинство мер помехозащиты связано с увеличением избыточности сигнала, а это отрицательно отражается на скорости передачи информации или других показателях РТС.

## Пропускная способность РЭС

Пропускная способность системы передачи или извлечения информации соответственно характеризует максимально допускаемую этой системой скорость передачи или извлечения информации с заданной степенью достоверности.

Обычно количественно под пропускной способностью  системы понимают максимальное значение средней скорости  передачи или извлечения информации, допускаемое этой системой при заданных требованиях к достоверности передачи или извлечения информации:

 при ,

где  – средняя скорость передачи или извлечения информации;

 – среднее количество информации (в битах), передаваемой или извлекаемой системой за время  (в секундах);

 – показатель достоверности передаваемой (извлекаемой) информации.

### *Потенциальная пропускная способность систем передачи информации*

Известно, что при передаче дискретных сообщений по непрерывному каналу (способен передавать сигналы, непрерывные по времени и значениям в каждый момент времени) при наличии аддитивных независимых нормальных белых шумов в каналах потенциальная пропускная способность канала определяется основной формулой Шеннона:

,

где  – средняя мощность сигнала;

 – полоса пропускания канала;

 – спектральная плотность шума.

При снятии ограничений на величину полосы  максимум величины пропускной способности получается при  и равен

.

Реальная пропускная способность систем передачи информации ниже потенциальной из-за ограничений пиковой мощности сигнала и конечности запаздывания в передаче информации. В частности К. Шенноном было показано, что ограничение средней мощности не приводит к увеличению пропускной способности при выполнении условия . Также известно, что из-за конечности запаздывания в передаче информации потери в пропускной способности составляют 1…5 дБ в зависимости от допустимой вероятности ошибки.

### *Потенциальная пропускная способность систем извлечения информации*

В системах извлечения информации невозможно извлечение информации со сколь угодно малой вероятностью ошибки  из-за невозможности идеального кодирования сообщений источника информации. Поэтому потенциальная пропускная способность системы извлечения информации определяется при условии, что вероятность ошибки конечна, но достаточно мала.

Для радиолокатора обнаружения максимальное количество целей, которое может быть обнаружено в единицу времени, определяется выражением

,

где  – время на обнаружение одной цели.

Потенциальная пропускная способность радиолокатора обнаружения определяется минимальным временем , затрачиваемым на обнаружение сигнала с заданными вероятностями пропуска сигнала  и ложной тревоги . В случае оптимальной обработки эхосигналов известной формы потенциальная пропускная способность радиолокатора обнаружения при наблюдении отраженного сигнала на фоне аддитивного независимого нормального белого шума со спектральной плотностью  определяется выражением

,

где  – средняя мощность сигнала;

 – спектральная плотность аддитивного независимого нормального белого шума.

При этом минимально требуемая полоса пропускания радиолокатора .

В случае локатора измерения в каждом угловом направлении требуется не обнаруживать цель (она уже обнаружена), а определить дальность до цели. При этом полагается, что цель может находиться на любой дальности в пределах диапазона , а весь интервал дальности разбивается на  ячеек дальности, в пределах которого ошибка измерения дальности не превышает половины длительности ячейки по дальности () с вероятностью ошибки .

Пропускная способность радиолокатора при измерении дальности в этом случае определяется временем, затрачиваемым на измерение дальности до цели, находящейся в заданном угловом направлении:

,

где  – время на измерение дальности одной цели.

Известно, что потенциальная пропускная способность радиолокатора измерения дальности определяется выражением:

.

Минимально необходимое значение требуемой полосы пропускания должно удовлетворять условию формирования  ортогональных сигналов на интервале времени : .

## Экологическая совместимость РЭС

Под экологической совместимостью РЭС понимают возможность создания этой системы, ее функционирования и утилизации без нанесения недопустимого ущерба среде обитания людей и непосредственно самим людям. При этом ущерб среде обитания считается недопустимым, если он может существенно ухудшить существование людей данного или последующих поколений.

При создании, функционировании и утилизации РЭС ущерб людям может наноситься следующими путями:

– генерацией интенсивных электромагнитных излучений или высоких напряжений, наносящих вред здоровью людей, животному и растительному миру;

– какими-либо другими нарушениями требований техники безопасности (повышенной взрывоопасностью например);

– чрезмерным расходованием ограниченных природных ресурсов – энергии и веществ;

– загрязнением среды в процессе утилизации системы.

К показателям, количественно учитывающим степень удовлетворения требований экологической совместимости, относятся:

– потребляемая мощность;

– коэффициент полезного действия;

– средняя и пиковая мощность излучения на различных частотах и длительность излучения;

– надежность электрических и магнитных экранов;

– взрывобезопасность;

– масса расходуемых редких веществ на создание, функционирование и утилизацию РЭС;

– показатели степени засорения окружающей среды в результате ликвидации РЭС после окончания ее срока службы.

## Надежность РЭС

Надежность является понятием, включающим безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость.

Основной характеристикой надежности РЭС является вероятность  безотказной работы в течение времени . Для определения  удобно использовать понятие интенсивности отказов  – числа отказов в единицу времени:

.

Типичная зависимость  содержит три участка: участок приработки; участок нормального функционирования; участок износа. На участке нормальной работы интенсивность отказов не зависит от времени: . При этом вероятность безотказной работы принимает вид

.

Среднее время безотказной работы определяется следующим образом:

.

Надежность системы, состоящей из  элементов, определяется суммарной интенсивностью отказов:

,

где ;

– интенсивность отказов *i*-го элемента РЭС.

Основными путями повышения надежности являются:

− применение более надежных элементов;

− облегчение режимов работы аппаратуры;

− совершенствование технологии производства РЭС;

− замена механических переключателей электронными;

− замена аналоговой обработки цифровой;

− упрощение принципов действия РЭС;

− предварительная тренировка системы;

− регламентные работы;

− максимальное использование функциональных резервов;

− введение структурного резервирования;

− применение систем обнаружения и устранения неисправностей;

− повышение квалификации обслуживающего персонала.

*Функциональное резервирование* заключается в том, что система в случае отказа ее частей в целом сохраняет способность решать поставленные задачи с некоторым допустимым ухудшением качества. Например, в фазированных антенных решетках выход из строя нескольких процентов элементов ФАР не приводит к существенному ухудшению показателей качества системы.

Существуют различные типы *структурного резервирования*: нагруженное, облегченное и ненагруженное; постоянное и динамическое; общее, раздельное и скользящее; смешанное и др. При нагруженном резервировании резервные элементы находятся в тех же условиях, что и основные. При облегченном резервировании резервные элементы находятся в облегченных условиях. При ненагруженном резервировании резервные элементы включаются в работу лишь после обнаружения отказа работающего элемента.

## Масса и объем РЭС

Масса является важным показателем качества РЭС по следующим   
причинам.

Во-первых, масса в силу ее физической сущности характеризует сопротивление системы к неравномерным перемещениям во времени. Это свойство затрудняет транспортировку и эксплуатацию системы, если масса велика.

Во-вторых, в соответствии с законом тяготения сила притяжения, воздействующая на аппаратуру, пропорциональна ее массе. Это увеличивает стоимость доставки аппаратуры на орбиту Земли.

В-третьих, масса аппаратуры характеризует расход вещества на ее изготовление. При этом возрастает объем аппаратуры и ее стоимость.

Таким образом, следует, что в отличие от других показателей качества масса аппаратуры непосредственно влияет на объем РЭС и ее стоимость.

Существенная минимизация массы аппаратуры, если эта масса уже мала, в ряде случаев может быть ненужной. В то же время уменьшение стоимости системы практически всегда полезно. С учетом этих особенностей при проектировании в большинстве случаев показатель массы целесообразно переводить в разряд ограничения , а показатель стоимости рассматривать как главный показатель качества и требовать его минимизации.

Пути уменьшения массы и габаритов делятся на три большие группы:

− облегчение исходных данных;

− совершенствование конструкции и технологии производства РЭС;

− оптимизация по критерию минимума массы или объема принципов построения системы и значений ее параметров.

В соответствии со второй группой минимальные значения объема лимитируются тремя основными факторами:

− минимальными конструктивно и технологически осуществимыми размерами деталей, узлов и соединений между ними;

− возрастанием паразитных обратных связей;

− увеличением нагрева аппаратуры из-за повышения мощностей рассеяния на единицу объема.

# АДАПТАЦИЯ В РАДИОТЕХНИКЕ

## Характеристика проблемы

Реальная электромагнитная обстановка, в которой эксплуатируются РТС, является нестационарной, а условия работы (дальность до объекта, скорость передачи информации, режим работы и т. д.) постоянно меняются, поэтому характеристики системы могут оставаться оптимальными только в том случае, если производится слежение за изменениями параметров среды, и эти изменения учитываются при дальнейшей работе. Другими словами в каждый момент времени для устранения неоптимальности системы происходит самоподстройка РТС. Самонастройка, или самооптимизация, РТС в процессе эксплуатации с целью улучшения характеристик РТС в соответствии с изменениями ЭМО называется *адаптацией*.

Под *адаптивной системой* мы будем понимать такую систему, которая оптимальным образом реагирует на изменение условий работы и ЭМО.

Обобщенная функциональная схема адаптивной РТС представлена на рис. 4.1. Основным элементом данной схемы является измеритель параметров среды (ИПС), который анализирует и выдает информацию об изменяющихся параметрах ЭМО, таких, как насыщенность среды электромагнитными излучениями, характер этих излучений, условия распространения и т. д. Полученная с ИПС информация обрабатывается в решающем устройстве (РУ), где принимается решение, каким образом изменить параметры системы, чтобы РТС оставалась оптимальной. Управление параметрами системы обеспечивается устройством управления (УУ), которое вырабатывает сигналы управления параметрами РПДУ и РПУ.



Рис. 4.. Обобщенная функциональная схема адаптивной РТС:

ИПС – измеритель параметров среды; РУ – решающее устройство;

УУ – устройство управления

На рис. 4.2 схематично представлены признаки, по которым можно классифицировать методы и средства адаптации. На данной схеме отражены лишь наиболее существенные группы признаков.



Рис. 4.. Классификация методов и средств адаптации

Под ***адаптацией по месту*** понимается устройство, в котором происходит изменение параметров для подстройки системы к изменяющимся условиям работы. Адаптация может производиться как в отдельном устройстве (РПДУ, РПУ) так и во всей системе в целом.

В группу признаков «***по параметрам РТС»*** включены все те, которые так или иначе связаны с изменениями условий работы РТС. Наиболее широко используемыми устройствами адаптации по входному сигналу являются АРУ и АПЧ, которые применяются практически во всех современных РТС. Использование АПЧ дает возможность уменьшить полосу пропускания приемника.

*Адаптация по входному сигналу* используется на приемном конце РТС. Наиболее широко применяются АРУ и АПЧ приемника. В первом случае в соответствии с интенсивностью входного сигнала изменяется усиление приемника, при этом выходной сигнал должен оставаться по возможности постоянным. АПЧ осуществляет перестройку приемника при изменении частоты входного сигнала так, чтобы обеспечить хороший прием при относительно узкой полосе пропускания приемника. Такая мера улучшает частотную избирательность радиоприемника, что благоприятно отражается на обеспечении ЭМС системы.

*Адаптация по дальности* может проводиться либо за счет автоматической регулировки мощности (АРМ), либо за счет изменения скорости передачи информации. Положительный эффект такой адаптации – это экономия энергии, улучшение ЭМС и скрытности РТС.

*Адаптация по достоверности приема* осуществляется в РТС в целом. При замеченном снижении достоверности приема принимаются меры по ее увеличению. При этом потребуется затрата дополнительного времени, что в целом говорит о снижении скорости передачи информации в интересах обеспечения нужной достоверности. Иногда при усилении помех на данном участке диапазона частот в процессе работы можно перейти на другой участок и т. д.

*Смена режимов работы в РТС*, как правило, сопровождается определенной перестройкой в самой системе. Примером смены режимов может служить переход из режима поиска в режим сопровождения, производящийся за счет уменьшения ширины диаграммы направленности антенны, что в конечном счете позволит уменьшить излучаемую мощность. Переход от режима поиска сигнала к режиму передачи информации в РТС со сложными сигналами сопровождается значительными изменениями в характеристиках РТС. Достаточно заметить, что требования к отношению сигнал/шум на выходе приемника в указанных режимах различны. Это различие может реализоваться для ускорения поиска. Аналогичные рассуждения верны для РЛС при переходе от режима поиска целей к режиму измерения их координат.

***Устранение отдельных помех*** является эффективным средством обеспечения ЭМС. Сосредоточенные по спектру помехи устраняются *режектированием*. Сосредоточенные по времени помехи (импульсные) можно подавить установкой ограничителей на входе приемника. Бесспорно, режектирование нуждается в подстройке во время работы РТС, т. е. является адаптивным процессом. Ограничение на входе приемника нежелательно, поэтому к нему прибегают при невозможности использования других средств. В условиях нестационарной ЭМО требуется оценивать качество приема и при необходимости использовать ограничения. Такой подход к ограничению импульсных помех как к процессу, протекающему в соответствии с изменением ЭМО, позволяет считать его мерой адаптации. Широко используются методы *компенсации* отдельных радиопомех, предполагающие автоматическое реагирование РТС на помехи.

## Адаптивные РТС с обратной связью

**Общие сведения о РТС с обратной связью**

В адаптивных РТС с обратной связью имеет место саморегулирование по достоверности приема. По результатам приема система самонастраивается на более высокую помехоустойчивость. Вообще повышение помехоустойчивости возможно, *во-первых*, при обеспечении высокой избыточности передачи информации при создании РТС с учетом тяжелых условий эксплуатации и, *во-вторых*, при введении избыточности в процессе работы в соответствии с изменением ЭМО, т. е. применение адаптации.

Общая схема системы с обратной связью изображена на рис. 4.3. РТС состоит из станций Аи Б, связанных двумя радиолиниями. По первой из них (информационной) передается информация. Радиолиния состоит из передающего устройства, среды и радиоприемного устройства. Вторая радиолиния – радиолиния обратной связи (ОС) – состоит из радиопередающего устройства обратной связи (РПДУ ОС), среды и радиоприемного устройства обратной связи (РПУ ОС). Радиолинии связаны друг с другом на станциях А и Б. Таким образом, получена РТС двухсторонней связи, по которой в одну сторону передается информация, а в другую – сведения о качестве работы РТС. В реальных системах функции систем могут меняться, так что наличие ОС не ведет к существенному увеличению объема аппаратуры в системах двухсторонней связи.



Рис. 4.. Обобщенная структурная схема адаптивной РТС с обратной связью:

ОС – обратная связь; РПДУ ОС – радиопередающее устройство обратной связи;

РПУ ОС – радиоприемное устройство обратной связи

*Простейшим методом улучшения помехоустойчивости* является повторение сообщения. Чем сложнее обстановка, тем больше повторений. В этом случае очевидно, что повышение качества обеспечивается за счет снижения скорости передачи.

По каналу ОС можно передавать выработанное на приемном конце решение о том, что сигнал принят или не принят станцией Б. Таким образом, анализ качества и принятие решения производятся на приемном конце РТС. Если сигнал принят плохо, то по линии ОС передается команда повторить ранее переданное сообщение. Такая команда посылается до тех пор, пока не будет принято решение, что данное сообщение принято хорошо. РТС с таким порядком работы получили наименование *РТС с решающей ОС.*

В другом случае по каналу ОС сигнал как бы «возвращается» в том виде, в каком он был на станции Б. Канал ОС используется для передачи сигнала в обратном направлении. Полученный по каналу ОС сигнал сопоставляется с тем сигналом, который передавался, и на станции Апринимается решение повторять или не повторять передачу данного сообщения. Если ретранслированный сигнал в основном совпадает с переданным, то принимается решение передавать новые сообщения. Если же принятый по каналу ОС сигнал сильно искажен помехами, то принимается решение о повторении этого же сообщения до тех пор, пока не будет получен удовлетворительный результат. В данном случае решение о повторении или неповторении передач принимается на передающем конце РТС, и такие радиосистемы называют *РТС с информационной ОС.*

**Радиотехническая система с информационной обратной связью**

Функциональная схема РТС с информационной ОС изображена на рис. 4.4. Прямая связь осуществляется по линии от источника сообщения (ИС) через кодирующее устройство (КУ), радиопередающее устройство (РПДУ) станции А,через линию связи (ЛС), радиоприемное устройство (РПУ), декодирующее устройство (ДКУ), запоминающее устройство (ЗУ) станции Б. Помехи радиоприему поступают через линию связи и ОС. Именно эти помехи важны с точки зрения адаптации, поскольку они в наибольшей степени изменчивы (нестационарны), отличаются высокой неопределенностью, так как попадают в тракт приемника в основном по тем же путям, что и полезный сигнал.



Рис. 4.. РТС с информационной обратной связью:

ИС – источник сообщения; КУ – кодирующее устройство; УУ – устройство управления; ЛС – линия связи; ЛОС – линия обратной связи; ДКУ – декодирующее устройство;

ЗУ – запоминающее устройство; ИУ – исполнительное устройство;

УС – устройство сравнения

При любом качестве принятого сигнала работает ОС, которая включает кодирующее устройство связи (КУ ОС), РПДУ, линию обратной связи (ЛОС), приемное устройство (РПУ ОС) с соответствующим декодирующим устройством (ДКУ ОС). Ранее переданное сообщение и сообщение, совершившее «путешествие» на станцию Би обратно, должны быть идентичны настолько, чтобы возникла уверенность в правильности передачи данного сообщения. Идентификация или сравнение происходит в устройстве сравнения (УС).

Работа РТС развивается дальше примерно следующим образом: при совпадении сравниваемых сообщений продолжается передача от станции Ак станции Б новых сообщений, а первоначально принятое сообщение в станции Бпереносится из запоминающего устройства в исполнительное устройство (ИУ).

При несовпадении переданного и принятого сообщений на станцию Бпоступает команда «стереть» из ЗУ ранее полученное сообщение. Одновременно это же сообщение передается вторично, т. е. делается еще одна попытка повторить сообщение. Если считать, что при нестационарной ЭМО улучшаются условия работы РТС, то вторая попытка может оказаться удачнее первой. При неудаче второй делается третья попытка, и так до тех пор, пока не будет достигнута нужная степень совпадения в УС.

**Достоинство такой схемы**: гарантированное совершенно точное определение степени искажения переданного сообщения относительно исходного.

**Недостатки**:

1) РТС занимает в два раза большую полосу частот относительно передаваемого сообщения;

2) ошибки могут возникать как при прямой передаче сообщения, так и при обратной, что является существенным недостатком такой схемы.

**Радиотехническая система с решающей обратной связью**

Функциональная схема РТС с решающей ОС показана на рис. 4.5. В этом варианте РТС решение принимается на приемном конце системы на станции Б, а команда «повторить» или «не повторить» передачу поступает по ЛОС.

Рассмотрим один из частных случаев приема и приведем анализ сигнала в решающем устройстве (РУ). Предположим, что передача бинарная, а прием поэлементный. Решающая схема представляет собой в этом случае двухпороговое устройство (рис. 4.6). Пусть принимается случайное колебание *х*, являющееся аддитивной смесью сигнала *s* и шума *n*.



Рис. 4.. РТС с решающей обратной связью:

ИС – источник сообщения; КУ – кодирующее устройство; УУ – устройство управления; ЛС – линия связи; ЛОС – линия обратной связи; ДКУ – декодирующее устройство;

ИУ – исполнительное устройство; РУ – решающее устройство

Обычно рассматривается двухальтернативная задача: если принято колебание *x*=*s* + *n*, то возможны два варианта – сигнал есть или его нет. Решение такой задачи требует использования приемника с одним порогом.

Можно решать и трехальтернативную задачу: если принято колебание *х*, то полагают, что полезный сигнал есть либо полезного сигнала нет, или отмечают третью возможность, когда нет достаточной уверенности ни в том, ни в другом.

Таким образом, РУ имеет двухпороговое устройство – его пороги *u*пор1 и *u*пор2. При приеме детерминированного сигнала *s* по плотностям вероятностей *w*(*n*) и *w*(*s* + *n*) надо определить, присутствует сигнал *s* или нет. Как видно из рис. 4.6, при относительно низком уровне *u*пор1с достаточной уверенностью можно сказать, что сигнала нет. При высоком уровне второго порога *u*пор2 достаточно уверенно отмечают присутствие сигнала. Пороги *u*пор1 и *u*пор2 разбивают ось случайной величины *x* на три области – области *Х*1 и *Х*2, где сигнал уверенно присутствует или отсутствует, и область *Z*, в которой нет уверенности в присутствии *s*.

В таком РУ при попадании сигнала в область *Ζ* принимается решение о необходимости еще раз получить на станции Бсигнал. По ЛОС передается сообщение «Нет», что означает требование повторения до тех пор, пока колебание *x* не выйдет из области *Ζ.*

Заметим, что по ЛОС передается относительно мало информации. Так, на каждое сообщение линии связи передается двоичная единица информации по ЛОС. Вспомним, что в *РТС информационной ОС* прямой и обратный каналы загружены примерно одинаково, в связи с чем возник ранее отмеченный серьезный недостаток в *РТС с информационной ОС*: помехи могут одинаково поражать ЛС и ЛОС.



Рис. 4.. Выбор порога принятия решения в РТС с решающей ОС

В *РТС с решающей ОС* этот недостаток практически устранен. Помехоустойчивость ЛОС при малой скорости передачи информации намного лучше, чем в ЛС, так что помехами в линии обратной связи практически можно пренебречь. Вместе с тем в системах с информационной ОС контроль качества передачи кажется более надежным. Проще использование системы для передачи в обратном направлении. Так что сравнительная оценка систем с информационной и решающей ОС неоднозначна.

**Вероятность ошибочного приема в адаптивных системах с обратной связью и повторением сообщений**

Несмотря на все меры повышения помехоустойчивости, вероятность ошибки при передаче сообщения сохраняется. Для определения такой вероятности будем считать, что в системе с ОС передача последующего сообщения производится после проверки правильности приема предыдущего. При этом имеют место следующие случайные события:

1) переданное сообщение принято неправильно, и ошибка обнаружена – вероятность события *Р*о.о;

2) переданное сообщение принято неправильно, и ошибка не обнаружена – вероятность события *Р*н.о.

При отсутствии «памяти» в каждой передаче обнаружения ошибок независимы, при оценке совместных событий можно пользоваться произведением вероятностей. Индекс вверху в скобках будет обозначать порядковый номер передачи сообщения, повторяемого *r*раз до обеспечения правильного приема.

При первой передаче сообщения вероятность ошибки равна вероятности ее необнаружения, т. е.: .

Вторая передача будет характеризоваться ошибкой, вероятность которой равна произведению вероятности обнаружения ошибки в первой передаче на вероятность ее необнаружения во второй передаче: .

В третьей передаче образование ошибки происходит по тем же правилам: .

Для произвольной *r*-й передачи по аналогии можно записать .

Предварительно принятые оговорки дополним условием, что в процессе *r* передач условия работы РТС в среднем не меняются, что позволяет допустить равенства , .

Общую вероятность ошибки *Р*ош получим за счет суммирования вероятностей во всех *r* передачах:

.

Сумма в скобках может быть подсчитана как сумма *r* членов геометрической прогрессии. С учетом этого замечания получим

. (4.1)

При большом числе *r* при :

*Р*ош = *Р*н.о/(1 – *Р*о.о). (4.2)

**Расчет среднего числа повторений**

В зависимости от вероятности *Р*о.о обнаружения ошибки при условиях, принятых выше, можно найти необходимое среднее число повторений *r*ср**,** которое характеризует замедление темпа передачи сообщений по сравнению с процессом без помех. Рассуждение проводим примерно по такой же схеме, как и при определении вероятности ошибки.

В первый раз вероятность передачи сообщения равна единице, во второй раз – вероятности обнаружения ошибки *Р*о.о при приеме сообщения при первой передаче, в третий – вероятности  и т. д. Произвольная по счету *r*-япередача состоится с вероятностью . В результате образуется ряд из вероятностей

. (4.3)

который можно представить как распределение вероятностей дискретных величин, представляющее собой геометрическую прогрессию. Такой ряд нормируем, определив нормирующий множитель β из соотношения . Заметим, что  является суммой бесконечной геометрической прогрессии, знаменатель которой равен *Р*о.о. Сумму бесконечно убывающей прогрессии, как известно, рассчитывают по формуле . Тогда β = 1 – *Р*о.о, и ряд (4.3) преобразуется в плотность вероятностей *w*(*r*) дискретных величин *ri*:

.

Среднее число *r*ср повторений рассчитывают по формуле, известной из теории вероятностей:

. (4.4)

Целесообразно иметь представление о тех значениях *r*ср, которые возможны на практике. Если считать, что можно использовать расчетную формулу (4.2) и потребовать, чтобы остаточная ошибка имела малую вероятность *Р*о.о << 1, то из (4.2) непосредственно следует

*Р*н.о << 1 – *Р*о.о. (4.5)

Если внимательно рассмотреть работу систем с ОС с повторением на основе независимого анализа только одного сообщения, то можно отметить три главных события:

1) переданное сообщение принято правильно, вероятность такого события *Р*пр;

2) переданное сообщение принято неправильно и ошибка обнаружена, вероятность *Р*о.о;

3) переданное сообщение передано неправильно и ошибка не обнаружена, вероятность *Р*н.о.

Эти события составляют полную группу, поэтому

*Р*пр + *Р*о.о + *Р*н.о = 1. (4.6)

Пусть *Р*о.о = 0,1, тогда β = 1 – 0,1 =0,9, а *r*ср = Σ *r w*( *r*) = 0,9 + 0,18 +   
 + 0,027 + … ≈ 1,11. Это значит, что скорость передачи при *Р*о.о = 0,1 будет в среднем снижена несущественно.

Способность РТС к рациональной самонастройке в соответствии с изменением ЭМО рассматривают как одну из эффективных мер обеспечения экономного использования электромагнитного ресурса – обеспечения ЭМС.

## Автоматическая регулировка усиления радиоприемника как средство улучшения электромагнитной совместимости

**Модель радиоприемника**

Автоматическая регулировка усиления (АРУ) приемника – один из видов адаптации РТС, выполняющейся на приемном конце по входному сигналу. Цель АРУ – улучшение качества приема сигналов за счет стабилизации их уровня на выходе приемника при большом динамическом диапазоне на входе.

Вместе с тем АРУ призвано улучшить ЭМС. За счет «загрубления» приемника уменьшается мешающее действие посторонних сигналов, в том числе и непреднамеренных помех.

При работе АРУ в соответствии с уровнем мощности *Р*с входного сигнала меняется усиление. При пороговом приеме регулируемый пороговый уровень варьирует от *Р*р min до *Р*р max, если полезный сигнал принимает значения от *Р*с 0 до *Р*с max. В идеальном случае выходная мощность приемника оказывается постоянной. Для этого случая можно изобразить (в единицах измерения мощности) амплитудную характеристику приемника (рис. 4.7).



Рис. 4.. Идеализированная амплитудная характеристика приемника при работе АРУ

Постоянная мощность *Ρ*вых поддерживается во всем динамическом диапазоне входных мощностей полезного сигнала. Это значит, что пороговое значение мощности всегда равно значению мощности входного сигнала, т. е. *Р*с = *Р*р, так что *Р*с 0 = *P*p min, а *Р*max = *Р*р max*.*

Будем считать, что пороговый уровень приемника устанавливается исключительно под действием полезного сигнала, т. е. приемник достаточно помехоустойчивый, адаптация происходит под влиянием только полезного сигнала.

Пусть радиоприемник входит в состав РТС односторонней связи и принимает сигналы только одного передатчика постоянной мощности. При этом единственной причиной изменения мощности полезного сигнала будем считать изменение расстояния *R* между передатчиком и приемником.

**Некоторые модели полезного сигнала**

Рассмотрим две ситуации, в которых осуществляется работа с АРУ.

*Ситуация 1.* Расстояние *R* от приемника до передатчика полезного сигнала – случайная величина с равномерным распределением. Это соответствует случайному равновероятностному положению передатчика на прямой, проходящей через точку расположения приемника. Такое распределение возможно при удалении или приближении передатчика к приемнику с постоянной скоростью, а расстояние между ними – случайная величина *R*. Плотность вероятностей запишем в виде *w*(*R*) = 1 / (*R*max – *R*min), (*R*max ≤ *R* ≤ *R*min).

При идеальной радиосвязи распределение мощности полезного сигнала на входе приемника

. (4.7)

Распределение (4.7) будет также распределением порогового уровня мощности приемника, устанавливаемого за счет работы АРУ, тогда среднее значение регулируемого порога мощности

. (4.8)

Таким образом, в данном случае среднее значение порога приема увеличится в число раз, равное корню квадратному из динамического диапазона полезных сигналов.

*Ситуация 2.* Передатчик РТС равновероятно располагается в любой точке плоской поверхности, ограниченной радиусами *R*min и *R*max. Радиоприемник находится в центре. Мощность *Р*ссигнала в этом случае будет описываться вероятностным распределением вида

, (4.9)

а среднее значение регулируемого порога приема равно

. (4.10)

## Эффективность адаптации.

**Эффективность использования АПЧ**. АПЧ приемника относится к адаптации по входным сигналам на приемном конце системы. Использование АПЧ позволяет улучшить частотную селекцию сигнала путем сужения полосы пропускания приемника. В процессе формирования, распространения и приема сигнала несущая частота изменяет свое первоначальное значение. Причинами такого изменения являются нестабильность частоты передатчика δ*f*прд, нестабильность частоты гетеродина приемника δ*f*гет, а также доплеровское смещение частоты для движущихся объектов Δ*F*д. Для приема такого сигнала без использования АПЧ полоса пропускания приемника должна быть увеличена на δ*f*пер + + δ*f*гет + Δ*F*д по сравнению с требуемой полосой Δ*F*с согласованной с шириной спектра.

Таким образом, полоса пропускания приемника без АПЧ должна быть равной

Δ*F*без АПЧ = Δ*F*с + δ*f*прд + δ*f*гет + Δ*F*д. (4.11)

Расширение полосы пропускания приводит к увеличению среднего числа помеховых сигналов на выходе приемника и как следствие уменьшению вероятности ЭМС. При использовании АПЧ происходит слежение за отклонениями несущей частоты, в результате частота настройки фильтра приемника всегда совпадает с несущей частотой сигнала, поэтому не требуется расширения полосы пропускания приемника Δ*F*с АПЧ = Δ*F*с.

Тогда выигрыш от использования АПЧ можно определить следующим образом:

. (4.12)

**Эффективность использования АРМ**. При эксплуатации радиоэлектронной системы, передатчик или приемник которой находится на мобильном объекте, а изменяющееся расстояние между ними меньше максимальной дальности действия *R*max, имеется возможность снижать мощность излучения без ущерба качеству функционирования. Такое изменение мощности передатчика, осуществляемое в автоматическом режиме, называется автоматической регулировкой мощности (АРМ). Следует определить, как на передающем конце радиолинии можно получить информацию о необходимости снижения мощности передатчика. В двухсторонних РТС связи по обратному каналу сообщают данные об уровне сигнала на приемном конце. В некоторых случаях известна дальность работы. Проще работать с РЛС, которые сами измеряют дальность до цели, кроме того, в РЛС можно непосредственно контролировать уровень сигнала на входе приемника, если приемник и передатчик расположены в одной точке, и снижать мощность передатчика до минимального уровня. При использовании АРМ средняя мощность излучения *Р*ср будет определяться средней дальностью *R*ср (*R*ср ≤ *R*max) до подвижного объекта, а значит *Р*ср всегда будет меньше максимальной мощности излучения *Р*max необходимой для обеспечения предельной дальности действия.

Уменьшение мощности излучения позволяет экономить энергию, улучшать экологическую и электромагнитную обстановку.

Выигрыш от использования АРМ оценивается отношением максимальной мощности к средней:

. (4.13)

Выигрыш в мощности за счет АРМ не очень большой, хотя и заметный. Поэтому применение АРМ вполне оправдано там, где не возникают серьезные трудности при ее реализации.

**Эффективность использования АРУ. Оценка выигрыша в электромагнитной совместимости**. Выигрыш в ЭМС обеспечивается за счет «загрубления» приемника на дальностях, меньших максимальной. Чем выше уровень входного сигнала, тем меньше коэффициент усиления, что эквивалентно увеличению уровня порога, а значит ослаблению действия помех. Таким образом, использование АРУ позволяет уменьшить среднее число помех проникающих на выход приемника. Среднее число помех *N*(*Р*ср), способных преодолеть порог *Рp*ср равно

. (4.14)

где *w*(*P*) – плотность распределения вероятности мощности помеховых сигналов;

*N*м.с – число мешающих сигналов на выходе приемника без АРУ.

Эффективность использования АРУ ε можно оценить как:

. (4.15)

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ

## Моделирование детерминированных сигналов

Использование ЦЭВМ в качестве основного инструмента математического моделирования приводит к необходимости реализации моделей сигналов и помех в дискретном времени. Поэтому задачу моделирования непрерывных детерминированных сигналов сформулируем, как задачу отыскания алгоритмов, позволяющих формировать на ЭВМ их дискретные реализации без потери информации об исходном сигнале.

Пусть требуется смоделировать детерминированный (неслучайный) радиосигнал

 (6.1)

где  **–** закон амплитудной модуляции;

 **–** закон фазовой модуляции;

 **–** круговая несущая частота;

 **–** начальная фаза.

Цифровой (дискретной) моделью сигнала  можно считать совокупность отсчетов, взятых с некоторым интервалом Т

 (6.2)

Интервал Т называется периодом дискретизации. При этом на некотором интервале наблюдения  сигнал будет представлен в виде вектора конечной длины , где **–** оператор транспонирования;  – длина вектора. Увеличивая период дискретизации Т, можно уменьшить длину N. Однако увеличивать Т сверх некоторого предела нельзя, так как при этом будет утрачена возможность восстановления непрерывного сигнала s(t)по вектору отсчетов *s* . Действительно, согласно теореме Котельникова, сигнал с ограниченным на интервале  спектром может быть представлен в виде следующего ряда:

 (6.3)

Зная отсчеты сигнала *s*(*nT*)*, п=0*, ±1, ±2, ... , на основе (6.3) можно восстановить значение сигнала в произвольный момент времени, если период дискретизации удовлетворяет критерию Найквиста – Котельникова:

 , (6.4)

где  – верхняя частота спектра сигнала.

Таким образом, модель сигнала *s*(*t*) может быть образована из отсчетов сигнала, взятых с периодом дискретизации, удовлетворяющим условию Найквиста – Котельникова (6.4). Такой метод моделирования сигналов называется *методом несущей*. Достоинством метода является его простота. Однако серьезным недостатком метода является выделение большого объема памяти ЭВМ для цифрового представления сигналов.

При моделировании ВЧ и СВЧ-сигналов на интервалах времени, значительно больших периода колебаний, используют метод огибающей. Запишем сигнал (6.1) в виде

, (6.5)

где ,

.

Процессы  и  называются квадратурами сигнала *s*(*t*), а комплексный сигнал

 (6.6)

называется комплексной огибающей сигнала. Сигнал  может быть восстановлен по своей комплексной огибающей  на основании следующего соотношения:

 , (6.7)

где  – оператор взятия действительной части комплексного числа;

.

Поскольку между и  существует связь (6.7), а верхняя частота  спектра *сигнала*  значительно ниже несущей , сигнал ** может быть представлен отсчетами своей комплексной огибающей  В данном случае период дискретизации выбирается также на основании соотношения (6.4), однако участвующая в этом неравенстве частота  соответствует верхней частоте спектра комплексной огибающей. Поэтому при одинаковом времени наблюдения *T*н количество отсчетов, необходимых для представления в дискретном времени сигнала, значительно меньше количества отсчетов сигнала  по методу несущей. Метод представления сигнала  с помощью процесса  называется методом огибающей. Данный метод позволяет значительно сократить объем памяти ЭВМ, используемой для хранения сигнала  по сравнению с методом несущей. Однако данный метод имеет и недостаток: огибающая является комплексным процессом, что делает необходимым хранение  отсчетов и использование при моделировании комплексной арифметики.

## Моделирование радиосигналов со случайными параметрами

### *Методы генерации случайных величин с равномерным законом распределения*

Получение случайных величин с равномерным законом распределения на интервале [0, 1] является базовой операцией для генерации случайных величин с произвольным законом распределения. Случайная величина  распределена равномерно на интервале [0, 1], если ее плотность вероятности равна 

 (6.8)

Случайная величина  называется *базовой случайной величиной* (БСВ). Математическое ожидание и дисперсия случайной величины  равны

; (6.9)

. (6.10)

БСВ может формироваться тремя способами:

– с использованием табличного датчика;

– с использованием физического датчика;

– с использованием программного датчика.

*Табличный датчик БСВ* – это таблица случайных чисел, представляющая собой экспериментально полученную выборку реализаций равномерно распределенной величины. Применение табличных датчиков при моделировании ограничено двумя недостатками: нехваткой табличных случайных чисел; большим расходом оперативной памяти для хранения таблицы.

*Физический датчик БСВ* представляет собой специальное радиоэлектронное устройство, являющееся приставкой к ЭВМ. Он состоит из источника флуктуационного шума (шумящей радиолампы), значение которого является случайной величиной  с плотностью вероятности  и нелинейного преобразователя

, (6.11)

где  – дробная часть числа  относительно числа ;

 – целая часть числа .

В этом случае при условии  плотность вероятности случайной величины  стремится к равномерному закону распределения на интервале [0, 1]. Недостатками физического датчика БСВ является невозможность повторения ранее полученной реализации и схемная нестабильность.

Недостатками физического и табличного датчика не обладает программный датчик БСВ. *Программный датчик БСВ* может использовать принцип физического датчика БСВ. Пусть в момент времени  формируется случайная величина  в соответствии с выражением

, (6.12)

где  – случайная величина, подвергаемая преобразованию в момент времени .

При этом источник шума  вместо физического датчика подменяется обратной связью

, (6.13)

использующей  ранее полученных выходных значений программного датчика. Числа  называются исходными или стартовыми числами. Таким образом, получается рекуррентная формула расчета последовательности псевдослучайных чисел:

. (6.14)

Термин «псевдослучайные» используется по следующим причинам: числа  не случайные по происхождению и являются результатом детерминированной функции; при специальном выборе функции  полученные числа только похожи на реализацию независимых БСВ. Согласно рассмотренному методу псевдослучайная последовательность вычисляется по рекуррентным формулам

; (6.15)

, (6.16)

где  – параметры программного датчика в виде натуральных чисел;

 – вычет числа  по модулю .

Последовательность  всегда зацикливается с периодом последовательности . Обычно параметр , где  – число двоичных разрядов ЭВМ. В этом случае максимальное значение периода , которое достигается для нечетного  при  (). Например, при  ; ; .

### *Методы генерации случайных величин с произвольным законом распределения*

Метод *обратных функций* называют еще методом нелинейного преобразования. Пусть имеется функция распределения случайной величины  , которая является монотонно возрастающей. Решением уравнения  является обратная функция . Предположим, что случайная величина  является БСВ. Можно показать, что случайная величина  имеет плотность вероятности .

Моделирующий алгоритм включает в себя следующие этапы:

1) по заданной плотности вероятности  находят функцию распределения ;

2) путем решения уравнения  относительно переменной *x* находят обратную функцию ;

3) моделируют реализацию БСВ ;

4) по формуле вычисляют реализацию искомой случайной величины.

Недостатками метода обратных функций являются:

1) аналитическая трудность нахождения функции распределения и обратной функции;

2) большой расход машинного времени на вычисление сложной обратной функции.

Для многих распределений даже функция  не выражается через элементарные функции, а табличное задание обратной функции  существенно усложняет моделирование. На практике используются приближенные аппроксимации функции распределения .

При *методе кусочных аппроксимаций* (метод Бусленко) предполагается, что плотность вероятности отлична от нуля на конечном интервале . Суть метода заключается в замене плотности вероятностей набором  прямоугольников, вписанных в плотность вероятности и имеющих одинаковые площади. Площади прямоугольников должны быть одинаковы и равны . Таким образом, для одного из прямоугольников .

Алгоритм моделирования по методу кусочных аппроксимаций заключается в следующем:

1) генерируется равномерно распределенное на интервале  число ;

2) с помощью числа  определяется номер , где  – операция округления до ближайшего целого. Таким образом, выделяется интервал ;

3) генерируется следующее число , равномерно распределенное на интервале ;

4) вычисляется случайное число , которое является реализацией случайной величины с заданным законом распределения.

Метод удобен для применения при значениях . Достоинством метода является малое число операций, не зависящее от значения . Недостатком метода является неодинаковая точность аппроксимации на всем интервале и неприменимость к распределениям с бесконечными «хвостами».

Есть два способа применения метода кусочных аппроксимаций к распределениям с бесконечными «хвостами». При первом способе производится усечение «хвостов» плотности вероятностей  с заменой заданной плотности на новую:  Путем увеличения интервала  различия моделируемой случайной величины  от искомой  могут быть сделаны сколь угодно малыми. При втором способе случайная величина  заменяется на новую  применением некоторого функционального преобразования , причем при ограниченной области распределения величины  величина  определена на бесконечном интервале. В качестве таких функций удобно брать функции вида  или . При этом область определения величины  составит  в первом случае и  во втором случае. Плотность распределения новой случайной величины  по правилам замены переменных связана с заданной плотностью распределения вероятностей следующим образом: . Генерация случайной величины  производится обычным образом. После ее генерации в соответствии с методом обратных функций производится ее пересчет в : .

Если плотность распределения вероятностей  моделируемой случайной величины имеет сложный аналитический вид и метод обратной функции неприменим, может использоваться *метод Неймана*. Как и в методе Бусленко, при методе Неймана генерируются два равномерно распределенных числа  и  и осуществляется проверка, попадает ли точка с координатами  под кривую вероятности. Если это выполняется, то запоминается первое число , которое используется для вычисления значения случайной величины . Если точка  не попала под кривую плотности вероятности, генерируется новая пара  и . Таким образом, критерием отбора пары чисел является неравенство (рис. 6.1) .

Это эквивалентно таким координатам случайных чисел  и , которые равномерно распределенных вдоль осей  и . Вероятность того, что случайная точка на плоскости, попавшая под кривую , окажется в элементарной полосе с основанием , равна площади полосы . Это и есть необходимое условие для того, чтобы случайная величина  имела заданную плотность распределения вероятностей   
.

Алгоритм получения последовательности случайных чисел для метода Неймана следующий:

1) из исходной совокупности равномерно распределенных на интервале  чисел выбирают числа  и ;



Рис. 6.1. Метод отбора Неймана

2) для чисел  и  осуществляют проверку неравенства ;

3) если неравенство справедливо, переходят к п. 4, в противном случае – к п. 1;

4) если неравенство выполняется, то очередное число определяется согласно соотношению .

Недостатком метода Неймана является существенное увеличение числа вычислений за счет вычисления величины и за счет отбрасывания некоторых пар чисел и , не удовлетворяющих условиям.

### *Моделирование гауссовских случайных процессов с заданными корреляционными свойствами*

Пусть требуется создать отрезок реализации комплексного гауссовского случайного процесса  длительности , если известна его корреляционная функция (КФ) . Гауссовские случайные процессы с заданными корреляционными свойствами могут быть сформированы двумя способами: методом дискретного преобразования Фурье и методом формирующего фильтра.

При использовании *метода дискретного преобразования Фурье* в соответствии с теоремой Винера – Хинчина спектральную плотность мощности (СПМ) случайного стационарного процесса  представляют в виде:

. (6.17)

Предположим, что процесс поступает на вход узкополосного фильтра с прямоугольной частотной характеристикой, отличной от нуля в полосе частот :

 (6.18)

где , – средняя частота и ширина полосы пропускания фильтра.

В этом случае средняя мощность сигнала на выходе фильтра будет равна

. (6.19)

Последнее уравнение определяет физический смысл функции : СПМ описывает распределение средней мощности случайного процесса  по частотам гармонических колебаний, входящих в его состав.

Такая интерпретация СПМ дает возможность предложить следующий метод генерации процесса . Разобьем частотную область на соприкасающиеся между собой полосы одинаковой ширины . Средняя частота полосы равна . Пусть величина взята настолько малой, что приближение  выполняется с высокой точностью. Тогда сумму гармоник случайного процесса , попадающих в -ю полосу, вследствие малости можно заменить на одно гармоническое колебание частоты , которое имеет случайную амплитуду и фазу . При этом для всего процесса будет справедливо следующее равенство:

, (6.20)

где – комплексная амплитуда -й гармоники.

Если процесс имеет ограниченный по частоте спектр, т. е. при , где – верхняя частота спектра, то бесконечный ряд можно заменить конечной суммой , где – количество гармоник, необходимое для моделирования случайного процесса. Тогда дискретные отсчеты процесса  во времени, взятые в соответствии с теоремой Котельникова с периодом дискретизации , могут быть получены следующим образом:

 , (6.21)

где .

Таким образом, отсчеты случайного процесса представляют собой дискретное преобразование Фурье (ДПФ) последовательности . Соответствующим выбором и можно сделать равным целой степени числа 2 (, где  – целое число). Это дает возможность использовать для вычисления алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Окончательно алгоритм генерации случайного процесса методом дискретного преобразования Фурье может быть представлен следующей последовательностью.

*1-й шаг.* На основании заданной корреляционной функции (или спектральной плотности мощности) процесса выбираются , ,  и , так, чтобы было целой степенью числа 2 ().

*2-й шаг*. Генерируется массив из независимых комплексных случайных чисел  с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

*3-й шаг.* Вычисляются комплексные амплитуды , где .

*4-й шаг.* На основании выражения  с использованием алгоритма БПФ вычисляются дискретные отсчеты случайного процесса .

Достоинствами метода являются:

– возможность моделирования случайных процессов с произвольным видом СПМ;

– возможность моделирования непрерывной временной задержки двух сигналов.

Однако данный метод имеет существенный недостаток – количество генерируемых отсчетов моделируемого процесса ограничено и должно быть определено заранее.

Генерация нормального случайного процесса *методом формирующего фильтра* основывается на двух положениях теории случайных процессов:

– результатом произвольного линейного преобразования гауссовского случайного процесса также является случайный гауссовский процесс;

– спектральные плотности мощности случайных процессов на входе и выходе линейного фильтра с частотной характеристикой  связаны соотношением .

Если предположить, что на вход фильтра поступает процесс типа белого шума (, ), то СПМ процесса на выходе будет равна . Следовательно, для формирования гауссовского случайного процесса с заданной СПМ  необходимо подать белый шум с единичной спектральной плотностью  на вход фильтра с частотной характеристикой, модуль которой . При этом сигнал на выходе будет иметь нормальное распределение, так как фильтрация – операция линейная. Фильтр, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) которого удовлетворяет условию , называется *формирующим.*

Равенство  дает возможность вычислить лишь АЧХ и не определяет его фазочастотную характеристику (ФЧХ). Поэтому этот вопрос остается открытым и требует дополнительного исследования. Однако если СПМ процесса – дробно-рациональная функция вида

, (6.22)

где , и ,  – действительные числа (), то процедура синтеза формирующего фильтра проста и состоит в следующем.

Из теории алгебраических уравнений известно, что неотрицательный линейный полином степени имеет лишь пар комплексно сопряженных корней. Тогда можно записать

 . (6.23)

Сделаем замену переменной в первой дроби и во второй (это возможно, так как – действительная переменная), получим:

, (6.24)

где ;

;

, .

Если взять в качестве частотной характеристики формирующего фильтра , получим устойчивый реализуемый фильтр, АЧХ которого соответствуют условию формирующего фильтра: .

Таким образом, алгоритм моделирования гауссовского случайного процесса с заданными корреляционными (спектральными) свойствами состоит в пропускании реализации белого шума с единичной спектральной плотностью через линейный фильтр, частотная характеристика которого соответствует .

Для успешного решения задачи моделирования методом формирующего фильтра необходимо, чтобы СПМ случайного процесса описывалась дробно-рациональной функцией от переменной . В ходе синтеза формирующего фильтра находят корни полиномов, стоящих в числителе и знаменателе, и приводят выражения для СПМ к виду . Затем составляют полиномы и . Частотная характеристика формирующего фильтра имеет вид .

Необходимо заметить, что для получения отрезка случайного процесса с заданными свойствами на выходе формирующего фильтра необходимо, чтобы переходные процессы в фильтре закончились. Поэтому к сохранению выборки случайного процесса нужно перейти только после того, как модель проработала некоторое время на «холостом ходу». Обычно это время оценивается как , где  – эффективная ширина пропускания формирующего фильтра.

Полученный в ходе такого синтеза фильтр является аналоговым. Кроме того, белый шум, который подается на вход формирующего фильтра, также является «аналоговым» сигналом. Поэтому необходимо создать математические модели формирующего фильтра и белого шума. Первая задача – синтез математической модели формирующего аналогового фильтра, т. е. цифрового фильтра, будет рассмотрена далее. Поэтому сейчас рассмотрим вопрос о генерации белого шума при цифровом моделировании.

Случайный процесс, который в научной литературе называется *белым шумом*, имеет спектральную плотность мощности , постоянную во всей частотной области. Следовательно, его средняя мощность (дисперсия) бесконечна. Поэтому белый шум не является физически реальным процессом, а представляет собой удобную математическую абстракцию. При создании его цифровой модели необходимо сохранить два его основных свойства – постоянство СПМ в частотной области и статистическую независимость временных отсчетов, взятых в произвольные моменты времени. Второе свойство реализуется следующим образом. За реализацию дискретного белого шума берется набор независимых случайных чисел, получающихся на выходе генератора случайных величин с нормальным законом распределения, с нулевым математическим ожиданием и некоторой дисперсией . Очевидно, что величина этой дисперсии (т. е. средняя мощность процесса) должна быть каким-то образом связана со спектральной плотностью мощности «аналогового» белого шума , дискретная модель которого создается. Для того, чтобы связать эти величины, необходимо воспользоваться требованием постоянства СПМ в частотной области.

Известно, что при дискретизации непрерывного сигнала с периодом взятия отсчетов , спектральная функция дискретизированного сигнала становится периодической с периодом . Поэтому, если СПМ дискретного белого шума будет постоянна и равна  на интервале , то автоматически она будет постоянна и во всей частотной области. С другой стороны, дисперсия случайного процесса с равномерной в указанном интервале СПМ равна

. (6.25)

Следовательно, при  получаем, что дисперсия независимых случайных чисел, составляющих реализацию дискретного белого шума должна быть

 (6.26)

Таким образом, реализация дискретного белого шума размером отсчетов должна быть вычислена в соответствии со следующим равенством:

, , (6.27)

где  – случайные независимые числа с нормальным стандартным распределением.

# ОТЛАДКА, ТЕСТИРОВАНИЕ И ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ.

На втором этапе имитационного моделирования (разработка моделирующего алгоритма и построение моделирующей программы) важным последним пунктом является отладка, тестирование и проверка адекватности компьютерной модели (см. подраздел 5.4).

Под *адекватностью* обычно понимают степень соответствия модели реальному явлению или объекту, для описания которого она строится. С другой стороны, создаваемая модель ориентирована, как правило, на исследование заданного набора свойств исследуемого объекта. Поэтому можно считать, что адекватность модели определяется степенью соответствия ее как системе-оригиналу, так и общему замыслу и целям моделирования.

Невозможно строго доказать, что та или иная имитация является правдивым отображением системы-оригинала. Хотя имитационная модель всегда создает обманчивое впечатление реальности, в ней, как правило, присутствуют ошибки. *Эти ошибки бывают трех типов*:

* ошибки и неточности исходной математической модели объекта моделирования;
* ошибки, возникающие при разработке общего моделирующего алгоритма;
* ошибки программного продукта, реализующего имитационную модель.

Если ошибки первого типа в принципе могут быть проанализированы и устранены, то факт наличия ошибок второго и третьего типов в окончательном варианте программы полностью исключить нельзя. Для их устранения требуются значительные затраты времени, связанные с проведением тестовых испытаний модели, и наличие специальных навыков разработчика. Даже в нормативных документах, относящихся к вопросам эксплуатации наиболее надежных автоматизированных систем управления военного назначения, допускается возможность появления и устранения ошибок в программном обеспечении. Согласно существующим взглядам, вероятность возникновения ошибок в процессе эксплуатации программных продуктов отлична от нуля на протяжении всего жизненного цикла системы. Соответствующая зависимость носит, как правило, экспоненциальный характер.

Анализируя и обобщая известные *методы и приемы проверки адекватности имитационной модели*, можно сгруппировать их в следующие.

* 1. Метод предельных точек, основанный на проведении модельног

эксперимента для вариантов исходных данных, обеспечивающих функционирование имитационной модели в таких режимах, для которых конечный результат является либо тривиальным, либо известным, либо может быть относительно просто получен аналитическими методами. В частности, допускается замена некоторых стохастических элементов модели детерминированными, при которых можно получить «ожидаемые» результаты. Рекомендуется также проводить исследования «непрерывности» реакции модели по отношению к изменениям исходных данных в диапазоне возможных значений.

* 1. Метод проверки преобразований от входа к выходу (метод «честного прочтения»), основанный на использовании специальных датчиков (препроцессоров и постпроцессоров) на входах и выходах основных модулей и узловых точек имитационной модели. Получаемые от них данные подвергаются анализу с целью выявления логических ошибок в тексте программы.

Два следующих метода проверки адекватности имитационной модели являются более строгими и базируются на использовании аппарата математической статистики для анализа данных, получаемых в ходе тестирования модели.

* 1. Метод верификации формируемых в ходе имитационного моделирования данных с данными, получаемыми в ходе натурных испытаний или на других моделях. Для повышения достоверности сравнения данных, полученных тем или иным образом, привлекается аппарат математической статистики и его многочисленные критерии проверки статистических гипотез.
  2. Метод получения статистически значимых выводов относительно данных, получаемых в процессе имитационного моделирования. Этот метод ориентирован прежде всего на анализ степени однородности данных, получаемых в ходе повторяющейся серии имитаций. Для анализа также могут привлекаться априорные сведения о характере распределения оцениваемых на выходе модели величин, что позволяет свести проверку адекватности к проверке гипотез о соответствии распределения данных моделирования и выходных характеристик реальной системы. Решение этой задачи далее будет подробно рассмотрено в разделе, посвященном обработке результатов имитационной модели.

В заключение необходимо отметить, что вопрос проверки адекватности имитационной модели имеет две стороны: приобретение уверенности в том, что модель в заданном аспекте ведет себя таким же образом, что и реальная система; определение в ходе специальных исследований корректности и достоверности получаемых на модели данных. Обе эти составляющие в совокупности сводятся к задаче нахождения равновесия между ценой каждого действия, связанного с проверкой адекватности, и последствиями ошибочных заключений.

# СТРАТЕГИЧЕСКОЕ И ТАКТИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Пусть моделируемая система  характеризуется вектором своих параметров , значениями которых можно управлять в ходе компьютерного эксперимента, и вектором показателей качества *.* В результате компьютерного моделирования системы  при заданных значениях вектора параметров  получают фазовую траекторию системы  и значения показателей качества . Компьютерные задачи могут использоваться для решения различных задач исследования РЭС.

Задача 1. Оценивание значений показателей качества .

Задача 2. Оценивание функциональной зависимости показателей качества от параметров .

Задача 3. Сравнение показателей качества системы для различных значений параметров:  и .

Задача 4. Оптимизация системы на множестве возможных значений параметров для некоторого скалярного результирующего показателя качества .

Значения параметров  в ходе компьютерного эксперимента могут задаваться неоднозначно, что определяется задачами эксперимента. Существуют различные способы организации компьютерного эксперимента, позволяющие получить выборку значений показателей эффективности . Процесс задания значений параметров  и способа формирования выборки значений показателей эффективности , обеспечивающих эффективное решение задач исследования системы, называется *планированием компьютерных экспериментов*.

## Принципы оптимизации модельного эксперимента

Оптимизация модельного эксперимента является важным элементом общей технологии разработки и эксплуатации имитационной модели. Она базируется на использовании методов планирования эксперимента. Третий этап имитационного моделирования (исследование моделируемой системы с помощью имитационной модели) включает в себя планирование имитационного (модельного) эксперимента.

Моделирование на ЭВМ требует затрат труда и времени исследователя, а также затрат машинного времени. Чем больше средств вложено в данное исследование, тем меньше их остается на остальное. Поэтому всегда необходимо иметь план, позволяющий извлекать из каждого эксперимента максимально возможное количество информации при минимальных затратах. Планирование процесса эксплуатации имитационной модели не только дает возможность получить необходимую экономию, но и обеспечивает формирование некоторой структурной основы исследований, позволяющей упростить и упорядочить проведение анализа результатов моделирования.

Таким образом, можно дать следующее определение: *планирование ИМ представляет собой совокупность методов и приемов получения необходимой информации с учетом затрачиваемых на это ресурсов при помощи эксперимента на разработанной модели*. Выделяют стратегическое и тактическое планирование.

*Стратегическое планирование* – планирование совокупности экспериментов, различающихся по исходным данным, в ходе которых должна быть получена вся необходимая информация о системе, т. е. определены все интересующие исследователя свойства. Эти свойства описываются компонентами вектора *u* = *K*(*Swv*, *w*) оценочной функции эффективности варианта системы при заданных внешних условиях. Например, для исследования зависимости дальности действия радиосистемы передачи информации от мощности передатчика необходимо провести некоторое количество экспериментов при различных мощностях передатчика.

Соответственно план экспериментов позволяет разработать экономную стратегию задания исходных данных:

– конечного числа вариантов структур *Wa =* {*Wa*1, … , *WaN*};

– подмножеств значений параметров *Va =* {*Va*1, … , *VaN*} для каждого из

вариантов структур;

– конечного множества элементов, определяющих характеристики внеш-

ней среды Ω*a* = {*wa*1, … , *wаM*}, по отношению к которым определяется эффективность системы.

Данная стратегия должна, с одной стороны, обеспечить перекрытие всего спектра гипотез и условий, подлежащих проверке в ходе анализа вариантов системы, и, с другой стороны, реализовать обозримый по времени и экономичный по затратам характер исследований путем определения наиболее информативных наборов исходных данных для имитационного моделирования.

В ходе стратегического планирования решаются обычно два типа задач: объяснение соотношения между контролируемыми (входными) параметрами и выходными показателями; определение сочетания параметров, которые оптимизируют в некотором смысле выходные показатели.

*Тактическое планирование* обеспечивает оптимизацию статистических испытаний в смысле минимизации их объема при выполнении заданных требований к точности и достоверности для фиксированных исходных данных (в одной точке стратегического плана). При фиксированных исходных данных модельный эксперимент состоит из серии повторяющихся имитаций процесса функционирования системы, что позволяет получить усредненную картину относительно ее эффективности с учетом случайного характера протекающих процессов и явлений. Естественно желание получить более точные оценки исследуемых показателей эффективности при минимальном объеме испытаний, который определяется количеством однотипных актов имитации или, как еще говорят, размером получаемой выборки данных моделирования. Эта задача и решается при тактическом планировании.

Таким образом, можно заключить следующее: если стратегическое планирование есть оптимизация проведения экспериментов «в большом», то тактическое планирование есть оптимизация процесса моделирования «в малом» для каждой точки фазового пространства исходных данных, определяющих облик исследуемой системы и характеристики внешней среды.

## Тактическое планирование модельного эксперимента. Определение объема статистических испытаний при эксплуатации имитационной модели

Тактическое планирование связано с определением эффективности и ресурсоемкости каждого конкретного эксперимента, представляющего собой серию повторяющихся и однотипных испытаний (прогонов) имитационной модели в смысле задания исходных данных или комбинаций факторов, установленных в ходе стратегического планирования. Тактическое планирование сводится к решению двух типов задач:

– определение начальных условий в той мере, в какой они влияют на

установление стационарного режима работы модели:

– снижение погрешности (дисперсии) получаемых при моделировании

оценок реакции системы при одновременном сокращении объема испытаний (числа прогонов).

*Первая задача* возникает вследствие искусственного характера функционирования имитационной модели. В отличие от реального объекта, который часто функционирует непрерывно, у модели всегда существует переходный период, связанный с тем, что случайные процессы, разыгрываемые в модели, требуют определенного времени для выхода в установившийся режим. Возникает задача снижения или исключения влияния начального периода при проведении каждого прогона модели. При этом используют три основных подхода:

– увеличение длительности каждого прогона так, чтобы влияние пере

ходного периода было заведомо незначительным;

– исключение из рассмотрения начального периода, т. е. введение этапа

специальной предварительной «раскрутки» процесса имитации случайных величин и процессов;

– искусственный подбор близких к режимным начальных условий для

каждой реализации, например использование одной длительной реализации случайного процесса, разбиваемой для каждого прогона на отдельные фрагменты.

Следует отметить, что при решении первой задачи тактического планирования в рамках рассмотренных подходов используют в основном эвристические приемы, опирающиеся на знание физики разыгрываемых в имитационной модели процессов.

В отличие от первой *вторая задача* тактического планирования может быть решена строго математически. *Данная задача фактически сводится к определению гарантированного объема испытаний (размера выборки, числа прогонов) для получения требуемой точности оценивания компонентов отклика системы, описывающих ее эффективность*. При этом будем разделять ситуацию оценки величины непрерывнозначного показателя эффективности системы и величины, характеризующей вероятность наступления тех или иных событий, описывающих «хорошие» и «плохие» исходы функционирования системы.

**Оценка непрерывнозначной величины**. Обычно в ходе моделирования в этом случае проводится оценка математического ожидания *m* и дисперсии *D* некоторого компонента реакции системы по формулам:

, , (9.)

где *ui* – наблюдение исследуемой случайной величины *U*, полученное в *i*-й реализации процесса испытаний, ;

*n* – количество повторяющихся испытаний.

Величина , как правило, характеризует такие показатели, как среднее время выполнения системой своих функций, средний расход энергоресурсов и т. д. Величина  определяет разброс показателя относительно среднего значения, а кроме того, часто выступает как самостоятельный показатель, например как показатель точности наведения ракеты на цель.

В ходе модельного эксперимента определение требуемого объема испытаний, т. е. конкретного значения *п*,проводится на основе *метода доверительных интервалов.* При этом необходимо найти такой размер выборки, который гарантировал бы попадание истинных и оцениваемых значений *т* и/или *D* внутрь некоторых заранее заданных интервалов с вероятностью 1 – α*.* Выбор интервалов обычно целесообразно задавать исходя из следующих соотношений:

 (9.)

где *dm*, *d*σ – величины, устанавливающие границы интервалов, которые обычно называют доверительными.

Именно такой подход к определению и заданию точности представления случайных оценок называют *методом доверительных интервалов*.

Пусть для параметра *Q* (математическое ожидание, дисперсия и т. д.) получена из опыта несмещенная оценка .



Очевидно, что для построения доверительного интервала должен быть известен закон распределения величины . Затруднение состоит в том, что закон распределения оценки зависит от закона распределения величины *U* и, следовательно, от его неизвестных параметров (в частности и от самого параметра *Q*). Для решения этой проблемы воспользуемся тем, что величина представляет собой, как правило, сумму *n* независимых одинаково распределенных случайных величин и, согласно центральной предельной теореме, при достаточно большом *n* (*n* > 20…50) ее закон распределения можно считать нормальным.



**Оценка математического ожидания**. Доверительный интервал надежностью γ для *математического ожидания* *dm* случайной величины *U* с неизвестным законом распределения имеет вид:

 (9.)

где γ = 1 – α – величина надежности оценки;

σ – среднеквадратическое отклонение;

 – значение аргумента функции Лапласа .

Доверительный интервал надежностью γ для *математического ожидания* нормально распределенной случайной величины *U*:

 (9.)

где  – *t*-статистика или распределение *Стьюдента*.

Конечные уравнения, связывающие доверительный интервал *dm*, оценку дисперсии и количество опытов *n* следующие:



, , , (9.5)

где *t*kp (α) вычисляется по специальным таблицам, исходя из заданного значения α;

*Sn*–1 (*t*) – функция распределения Стьюдента.

Реальное использование полученных соотношений в имитационной модели основано на проведении пробной оценки доверительного интервала или введении правила автоматического останова процесса имитации до получения интересующей нас точности.

Необходимо отметить, что при *п >*30 *t*-распределение хорошо аппроксимируется гауссовским законом. При этом



**Оценка выборочной дисперсии**. Доверительный интервал надежностью γ для *дисперсии* *dD* случайной величины *U* с неизвестным законом распределения имеет вид

 (9.6)

где  – значение аргумента функции Лапласа .

Доверительный интервал надежностью γ для *дисперсии* нормально распределенной случайной величины *U*:

 (9.7)

где  и  – значения, взятые из таблицы распределения χ2.

Окончательно получим следующие уравнения:

 (9.8)

**Оценка вероятности события**. Доверительный интервал надежностью γ для вероятности *p* случайной величины *U* имеет вид

 (9.9)

где *p*\* = *p*\* (*U*) = *m*/*n* – частота появления события *U* в *n* опытах;

*m* – число опытов, в которых произошло событие *U*;

*n* – число проверенных опытов.

Уравнение, связывающее *dp* и *n*, имеет вид

 (9.10)

Для того чтобы избавиться от неизвестного значения *р*, можно заменить произведение *р*(1 – *р*) на величину . Тогда окончательно получим выражение для гарантированных значений *dp* и *п*:

 (9.11)

Таким образом, общий подход к оптимизации процесса имитации в ходе тактического планирования заключается в нахождении уравнений, связывающих доверительные интервалы, т. е. требуемую точность оценки величин в ходе имитационного моделирования, с необходимым объемом выборки. На основе использования определенных приемов и приближений для законов распределения оценок в этих уравнениях при этом должны исключаться значения статистических характеристик этих законов, которые являются недоступными исследователю.