

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Виталий Викторович Цыбин

**«Разработка системы комплексной диагностики бортового
радиосвязного оборудования на базе микроконтроллеров»**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание академической степени «магистр» по спе-
циальности 5А522007 – «Техническая эксплуатация ра-
диооборудования летательных аппаратов»

Научный руководитель:

к.т.н. доцент Олег Муратович Курбанов

ТАШКЕНТ 2008г

Аннотация

Повышение уровня безопасности полета являются одной из важнейших задач существующих на сегодняшний день. Этого можно достичь путем повышения эффективности процессов технического обслуживания и ремонта авиационного радиоэлектронного оборудования, за счет применения развитых систем технической диагностики и контроля.

В настоящей диссертационной работе излагаются принципы построения эффективной системы комплексной диагностики для бортового радиосвязного оборудования.

В работе производится классификация существующих в настоящее время систем, видов и методов диагностирования, и предлагается несколько путей для их улучшения, как в теоретическом, так и в практическом плане. Ряд теоретических выкладок и предложений, освещенных в настоящей диссертационной работе, является уникальным.

В частности в работе предлагается путь повышения эффективности использования алгоритмов для поиска места отказа в радиоэлектронном оборудовании на основе методов безусловной оптимизации функций – метода золотого сечения и метода Фибоначчи.

Одним из немаловажных факторов при проведении диагностики является выбор минимальной совокупности диагностических параметров для контроля работоспособности и определение последовательности их анализа. В диссертационной работе приводится решение данной проблемы с использованием метода на основе сигнальных графов.

Для определения параметров амплитудно-модулированного колебания, в частности глубины модуляции, в работе предложен метод на основе синхронного детектирования.

При технической реализации теоретических положений данной диссертации применяются современные достижения микроэлектроники, позволяющие повысить эффективность функционирования системы комплексной диагностики.

В частности в качестве генераторов тестовых сигналов используются синтезаторы частоты с прямым цифровым синтезом. В работе указывается на необходимость применения в системах диагностики накопителя информации, при разработке технической реализации в качестве накопителя диагностических данных была выбрана flash-карта.

Особое внимание в данной работе выделяется роли компьютера в диагностических системах. В диссертации предлагается использовать объединение системы встроенной диагностики и контроля (на базе микроконтроллера) с персональным компьютером.

В настоящей работе детально рассматриваются также реализация отдельных узлов принципиальной схемы предлагаемой системы комплексной диагностики связной радиостанции. И, кроме того, были разработаны основные модули диагностического программного обеспечения для компьютера на языке Delphi.

Synopsis

Increasing level of flight safety is one of the most important problems existing per present day. This possible the reach by increasing the efficiency of technical maintenance processes and repair of aeronautical radioelectronics equipment, that perhaps when by using efficient technical diagnostics and checking systems.

In given dissertation are researched the principles of creating the system of complex diagnostics for on-board radio-communication equipment.

In work is produced categorization of diagnostics systems, of existing kinds and methods of diagnostics, and are offered the several ways for their improvement, as in theoretical so and in practical plan. The row of theoretical findings and offers, examined in persisting dissertation are is unique. In particular, in this thesis is offered way for improvement of efficiency the failure's search in radioelectronics equipment, based on methods of unconditional optimization of functions – the methods of gilded section and Fibonacci.

For determination the depth the inflexions for modulated fluctuation, in existing dissertation is offered method, based on synchronous detection.

One of the important factors when undertaking the diagnostics is a choice of minimum array of diagnostic parameters, and determination the sequences of their analysis. In given dissertation this problem decides by method, based on signal's graph.

At technical realization of theoretical achievements received at given dissertation are used the modern achievements of microelectronics, thereby perfecting (improving) efficiency the systems of complex diagnostics.

In present dissertation instead of ordinary generators of test-signals are used synthesizers with direct digital syntheses. In given dissertation was indicated practicability of the using the memory device in built-in diagnostics system for keeping of diagnostic information.

At development of the technical realization of diagnostic system for keeping of diagnostic information was selected the flash-card. Emphases in this dissertation stand out the roles of computer in present diagnostics systems. In dissertation is transacted integration of the built-in diagnostics system (based on microcontroller) with personal computer.

Either, in given dissertation, were designed the separate nodes of principle scheme for proposed complex diagnostics system. And, furthermore, were designed basic modules of diagnostic software for personal computer (on Delphi language).

Annotatsiya

Uchishning xavfsizlik darajasini ko'tarish shu kunning amaldagi muhim masalalaridan biri hisoblanadi. Bunga radioelektron jihozlarga texnik xizmat ko'rsatish va ta'mirlashning samaradorligini oshirish, rivojlangan texnikaviy diagnostik va nazorat tizimlarini qo'llash bilan erishish mumkin.

Mazkur dissertatsiya ishida bortdagi radioaloqa jihozlari uchun majmuaviy diagnostika-ning samarali tizimini ko'rish negizi keltirilgan.

Dissertatsiyada amaldagi tizimlar, diagnostika turlari va usullarining sinflanishi keltirilgan, va ularni yaxshilashning bir necha yo'llari taklif qilingan.

Mazkur dissertatsiya ishidagi yoritilgan qator nazariy qo'llanmalar va takliflar salohiyatlidir. Xususan, radioelektron jihozlarning nosozliklarni qidirish uchun funktsiyalarning shartsiz optimizatsiya usullaridan (oltin kesim va Fibonachchi) foydalanish taklif qilinadi.

Diagnostika o'tqazilgan eng muhim masalalaridan biri ishga yaroqliligini nazorat qilish uchun diagnostik parametrlarning minimal yig'indisini tanlash, va ularning tashxis ketma-ketligini aniqlash. Dissertatsiyada ko'yilgan muammolarni signallar grafidan qo'llash usuli bilan xalitish keltiriladi.

Ishda amplituda-modulyatsiyaviy tebranish parametrlarini, xususan, modulyatsiya chu-kurligini aniqlash uchun sinhron detektolash usuli taklif qilinadi.

Mazkur ishdagi nazariy holatlarni texnik amalga oshirishda mikroelektronikaning zamonaviy yutuqlari bilan qo'llanadi. Xususan, test signallar generatori sifatida to'g'ri rakamli sintezli chastota sintezatorlari qo'llanadi.

Ishda diagnostika tizimining axborot to'planishi zarurligi ko'rsatilgan, texnik amaliyati qaita ishlashda axborot to'plami sifatida flash-karta tanlangan.

Ushbu ishda diagnostika tizimida asosiy e'tibor komp'yuterning ahamiyatiga karatilgan. Dissertatsiyada kiritilgan diagnostika va nazorat tizimini (mikrokontroller asosida) shahsiy komp'yuter bilan birlashtirishni qo'llash taklif qilinadi.

Dissertatsiyada shuningdek taklif qilingan radioaloqaviy stantsiyaning diagnostika tizimi printsiplial shemalarining alohida tugunlari qurib chiqiladi. Bundan tashqari, diagnostikaviy dasturiy ta'minotining asosiy modullari Delphi tiliga qaita ishlangan.

Содержание

Аннотация	2
Synopsis.....	3
Annotatsiya.....	4
Содержание	5
Введение	7
Глава 1. Радиоэлектронное оборудование как объект технической эксплуатации.....	10
1.1. Отказы радиоэлектронного оборудования.....	12
1.2. Радиосвязное оборудование и его значение.....	14
1.3. Виды радиосвязного оборудования	15
1.3.1. Радиостанции ближней связи	16
1.3.2. Радиостанции дальней связи	20
1.3.3. Аварийные радиостанции	22
1.3.4. Передатчики для системы КОСПАС/SARSAT.....	24
1.3.5. Внутрисамолетные средства связи	29
1.3.6. Оборудование спутниковой связи.....	29
Глава 2. Техническое диагностирование радиоэлектронного оборудования.....	30
2.1. Виды технического диагностирования.....	33
2.2. Методы технического диагностирования	35
2.3. Диагностируемость радиоэлектронной аппаратуры.....	37
2.4. Обобщенная структура диагностической системы	38
2.5. Диагностические модели радиоэлектронной аппаратуры.....	40
2.6. Выбор совокупности диагностируемых параметров	44
2.6.1. Выбор допусков на диагностические параметры.....	49
2.7. Поиск места отказа в радиоэлектронной аппаратуре.....	50
2.7.1. Классификация методов поиска отказа	51
2.7.2. Применение методов оптимизации функций к поиску отказа.....	55
2.8. Прогнозирование технического состояния	58
2.8.1. Обзор методов прогнозирования технического состояния	61
2.8.2. Прогнозирование состояния методами численного анализа.....	64

Глава 3. Современные средства технической диагностики.....	67
3.1. Средства сбора и предварительной обработки данных	68
3.2. Средства управления и обработки параметров.....	69
3.3. Генераторы тестовых сигналов	71
3.4. Устройства отображения информации	75
Глава 4. Принципы построения системы комплексной диагностики.....	76
4.1. Методы получения и обработки диагностических параметров	79
4.2. Определение структуры системы комплексной диагностики.....	89
4.3. Выбор интерфейса для связи между компьютером и микроконтроллером.....	92
4.4. Элементы принципиальной схемы	96
4.4.1. Сопряжение микроконтроллера с персональным компьютером	98
4.4.2. Сопряжение микроконтроллера с flash-памятью	101
4.4.3. Управление работой DDS-синтезатора	105
Глава 5. Программный диагностический комплекс	107
5.1. Принципы организации диагностической программы	108
5.2. Модуль получения диагностических данных	111
5.3. Модуль определения технического состояния	114
5.4. Модуль прогнозирования технического состояния	115
Выводы о проделанной работе	118
Информационные источники	119
Список использованной литературы	119
Интернет источники	123
Приложения.....	125
Приложение 1. Функциональная схема радиостанции «Баклан»	125
Приложение 2. Подпрограмма вычисления быстрого преобразования Фурье	126
Приложение 3. Подпрограммы для работы с USART микроконтроллера.....	128
Приложение 4. Подпрограммы для работы с интерфейсом SPI	129

Введение

Повышение требований к безопасности полета и эффективности работы авиатранспорта требует повышения уровня надежности радиоэлектронного оборудования. Это создает необходимость создания новых высокоэффективных систем диагностики, способных осуществлять качественную диагностику бортового радиооборудования в сжатые сроки. Этому также способствует и развитие современных средств технического диагностирования. Существующие в настоящее время методы и алгоритмы диагностирования радиоэлектронных систем далеко не всегда удовлетворяют современным требованиям.

Цель работы: Разработка принципов создания эффективной системы комплексной диагностики бортового радиосвязного оборудования, с применением микроконтроллеров и персонального компьютера, создание эффективных алгоритмов диагностирования, позволяющих улучшить качество проведения технической диагностики.

Научная новизна: С целью повышения эффективности функционирования системы технической диагностики в настоящей диссертации проводится ряд научных исследований, направленных на улучшение и разработку алгоритмов диагностирования.

В частности, для более эффективного поиска места отказа, предлагается использовать методы оптимизации функций – метод золотого сечения и оптимальный метод Фибоначчи. Реализация данных методов позволяет заметно сократить время поиска отказа в сложной радиоэлектронной системе, особенно при большом количестве элементов.

В данной работе предлагается использовать интегрированные микропроцессорные структуры для проведения периодического контроля радиоэлектронного оборудования с выдачей результатов диагностики техническому персоналу в удобной для восприятия форме. Средства встроенной диагностики радиоэлектронного оборудования предлагается использовать совместно с персональным компьютером, что позволит реализовать более эффективные и сложные алгоритмы технического диагностирования.

Для оценки стабильности контролируемого диагностического параметра предлагается использовать периодический контроль определяющих параметров, с сохранением полученных данных во flash-память, и последующим их анализом на персональном компьютере. Применение запоминающего устройства в составе системы встроенной диагностики позволит более эффективно проводить прогнозирование технического состояния диагностируемого объекта и выявлять наиболее ненадежные блоки радиоэлектронного оборудования (а в ряде случаев и отдельные элементы) задолго до наступления их отказа.

В работе проведен анализ возможности применения в диагностической системе различных интерфейсов связи микроконтроллера и персонального компьютера с позиции

рассмотрения их потенциальной помехоустойчивости. Кроме того, был проведен сравнительный анализ различных методов получения и обработки диагностических параметров, и предложен способ получения параметров амплитудно-модулированного сигнала с использованием синхронного детектирования, с детальным анализом данного метода.

При создании диагностической системы важное место занимает создание многофункциональных генераторов тестовых воздействий. В настоящей работе эта проблема решается за счет применения в качестве генераторов тестовых сигналов DDS-синтезаторов. Применение подобных генераторов сигналов позволит реализовать сложные алгоритмы диагностирования, и как следствие повысить эффективность диагностирования.

Практическая ценность: При применении результатов исследований, проведенных в данной работе, можно значительно повысить качество работы систем диагностики и контроля, и сократить время проведения технического диагностирования без снижения качества его выполнения. Применение систем комплексной диагностики реализующих предлагаемые принципы позволит повысить безопасность полета. За счет применения микроконтроллерных систем резко снизится масса аппаратуры контроля и диагностики.

Структура диссертации: Настоящая диссертационная работа состоит из пяти отдельных глав, краткое содержание которых приводится ниже.

В первой главе рассматривается радиоэлектронное оборудование как объект технической эксплуатации и производится классификация отказов радиоэлектронного оборудования, отмечается важность значения радиосвязного оборудования. Также производится обзор существующих типов связного оборудования.

Во второй главе диссертации рассматривается техническая диагностика радиоэлектронных систем, производится классификация систем технической диагностики, видов и методов диагностирования. Также в данной главе рассматривается радиоэлектронное оборудование как объект технического диагностирования, и определяются параметры оборудования с позиций диагностируемости. Производится анализ существующих алгоритмов поиска места отказа, и отмечаются пути их улучшения, в частности предлагается использовать для поиска места отказа некоторые методы оптимизации функций – метод золотого сечения и оптимальный метод Фибоначчи. Кроме того, в данной главе рассматриваются вопросы выбора совокупности диагностических параметров, рассматриваются существующие алгоритмы и предлагается использовать для этих целей метод, основанный на анализе матрицы отображений сигнального графа диагностируемого радиоэлектронного оборудования. Также в главе рассматриваются вопросы, связанные с прогнозированием технического состояния радиоэлектронного оборудования, и подробно рассматривается применение для решения задач прогнозирования метода наименьших квадратов.

В третьей главе диссертации производится обзор существующих технических средств, необходимых при построении диагностической системы. Особо внимание уделяется генераторам диагностических воздействий. В работе предлагается использование синтезаторов частоты с прямым цифровым синтезом в качестве генераторов тестовых воздействий в системах технического диагностирования, производится подробный анализ их работы и отмечаются их преимущества по сравнению с другими типами генераторов.

В данной главе отмечаются преимущества при использовании для целей диагностирования персонального компьютера и средств микропроцессорной техники.

В четвертой главе выполняется сравнительный анализ методов получения и обработки диагностических параметров. В частности, в настоящей работе предлагается использовать для получения параметров амплитудно-модулированного сигнала синхронное детектирование, производится детальный анализ данного метода и сравнение его с несколькими другими. В этой же главе излагаются принципы построения комплексной системы технического диагностирования, приводится структурная схема системы в составе радиосвязной радиостанции. При осуществлении связи устройства встроенного контроля и диагностики с персональным компьютером остро стоит проблема выбора интерфейса обмена данными, вследствие чего в данной главе проводится анализ различных интерфейсов с позиции потенциальной помехоустойчивости и осуществляется выбор наиболее подходящего из них. В данной главе рассматриваются также и элементы принципиальной схемы предлагаемой диагностической системы, с детальным рассмотрением сопряжения микроконтроллера с flash-памятью, DDS-синтезатором и персональным компьютером.

В пятой главе излагаются принципы построения программного диагностического комплекса, приводятся упрощенные блок-схемы отдельных модулей, а также некоторые части кода разработанной программы (на языке Delphi). Кроме того, в данной главе диссертационной работы отмечается также возможность применения для проведения технической диагностики таких многофункциональных программных пакетов как MatLab.

После всех пяти глав приведены краткие выводы по всей проделанной работе и помещен список литературы и информационных источников, использованных при подготовке диссертационной работы. В приложения выведены функциональная схема радиостанции ближней связи «Баклан» и некоторые части программного кода (предназначенные как для микроконтроллера, так и для реализации на персональном компьютере).

По теме диссертационной работы опубликовано шесть статей в научных сборниках и журналах, в том числе в изданиях рекомендованных ВАК Республики Узбекистан.

Имеется также научная статья, принятая к печати, но не вышедшая на настоящий момент времени в зарубежном издании (вестник МГТУ ГА).

Глава 1. Радиоэлектронное оборудование как объект технической эксплуатации

Под технической эксплуатацией понимают комплекс мероприятий направленных на поддержание и восстановление заданного состояния системы. Техническая эксплуатация включает в себя транспортирование, хранение, техническое обслуживание и ремонт.

Техническое обслуживание является одной из наиболее важных составляющих процесса технической эксплуатации и представляет собой комплекс операций по поддержанию работоспособного или исправного состояния радиоэлектронного оборудования.

Ремонт представляет собой совокупность операций, целью которых является восстановление работоспособности или исправности радиоэлектронного оборудования [33].

В процессе технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования неоднократно возникает необходимость определения его текущего технического состояния.

Процесс выявления текущего технического состояния радиоэлектронного оборудования с заданной степенью точности называют техническим диагностированием [25].

Таким образом, техническая диагностика является неотъемлемой частью технической эксплуатации. Результатом процесса технического диагностирования является заключение о текущем техническом состоянии (а в случае использования прогнозирования технического состояния и о будущем состоянии) радиоэлектронного оборудования с указанием при необходимости места, вида и причины неисправности (отказа) [24].

Под техническим состоянием подразумевают совокупность свойств объекта, подверженных изменению в процессе производства или эксплуатации, и характеризующую в заданный момент времени признаками, установленными технической документацией.

Выделяют следующие основные виды технического состояния:

- исправное состояние;
- неисправное состояние;
- работоспособное состояние;
- неработоспособное состояние;
- состояние функционирования
- состояние отказа (нефункционирующее состояние).

Переходы радиоэлектронного оборудования из одного состояния в другое являются, как правило, случайными процессами. Наглядно эти переходы показаны на рис.1.1. Переход оборудования из одного состояния в другое объясняется возникновением отказа.

Под исправностью понимают состояние объекта, когда он соответствует всем требованиям предъявляемым технической документацией. Если объект технической эксплуа-

тации не соответствует хотя бы одному из требований установленных технической документацией на него, то говорят, что объект находится в состоянии неисправности.

Работоспособность это состояние объекта, при котором он способен выполнять возложенные на него функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах установленных соответствующей технической документацией. Если оборудование работоспособно, то оно не обязательно должно быть исправным. Например, при повреждении корпуса оборудование может быть работоспособным, но при этом оно является неисправным.

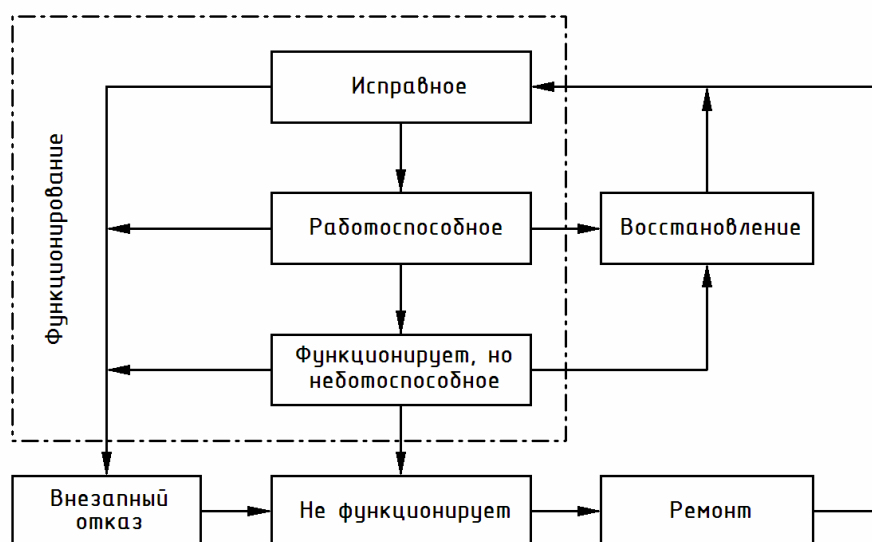


Рис.1.1. Диаграмма состояний радиоэлектронного оборудования

Неработоспособность это состояние объекта, при котором состояние хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям установленным нормативно-технической документацией.

Под функционированием понимают способность аппаратуры сохранять заданный характер работы. Если радиоэлектронное оборудование находится в состоянии функционирования, то при этом не обязательно чтобы оборудование было работоспособным.

Например, связанная радиостанция может сохранять функционирование, но при этом выходная мощность передатчика может не соответствовать номинальному значению. Радиостанцией в этом случае можно пользоваться, но дальность связи (при условии, что выходная мощность передатчика меньше номинальной) будет меньше. Если выходная мощность передатчика превысит значение верхнего допуска на ее значение, то могут возникнуть проблемы с обеспечением электромагнитной совместимости оборудования.

И последним основным видом технического состояния является состояние отказа радиоэлектронного оборудования, которое подробно описывается в следующем разделе.

1.1. Отказы радиоэлектронного оборудования

Отказ это событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта. Чаще всего под отказом понимают переход объекта из работоспособного состояния в неработоспособное, однако как видно из определения понятие отказа значительно шире [33].

Критерием обнаружения отказа является выход одного или нескольких параметров, характеризующих работоспособность объекта за пределы установленных допусков.

При этом конкретные изменения в объекте связанные с возникновением отказа (обрыв проводов, деформация деталей, несоответствие напряжения в заданной контрольной точке установленному документацией значению и т.д.) называют характером отказа.

Причины возникновения отказа различны [25]. Это могут быть дефекты, допущенные при конструировании, производстве или появившиеся из-за нарушения правил технической эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры, случайные повреждения, а также неисправности, обусловленные естественными процессами изнашивания и старения.

Классификация отказов довольно широкая и разветвленная.

По причинам возникновения отказа различают конструкционный отказ, производственный отказ и эксплуатационный отказ.

Конструкционный отказ – отказ, возникающий при проектировании радиоэлектронного оборудования, из-за нарушения установленных правил и норм конструирования.

Производственный отказ – отказ, возникающий в результате нарушения установленного процесса изготовления или ремонта радиоэлектронного оборудования, а также из-за несовершенства технологического оборудования.

Эксплуатационный отказ – отказ, возникающий в результате нарушения установленных правил и условий эксплуатации радиоэлектронного оборудования.

По характеру изменения контролируемого параметра до возникновения отказа различают внезапные и постепенные отказы.

Внезапный отказ – отказ, характеризующийся скачкообразным изменением одного или нескольких заданных параметров объекта.

Постепенный отказ – отказ, характеризующийся постепенным закономерным изменением одного или нескольких заданных параметров объекта.

По степени связи между отказами выделяют независимые и зависимые отказы.

Независимый отказ – отказ элемента не связанный с отказом или повреждением другого элемента заданного объекта.

Зависимый отказ – отказ элемента, обусловленный отказом или повреждением другого элемента заданного объекта.

По возможности применения объекта по его назначению после возникновения отказа различают полные и частичные отказы.

Полный отказ – отказ элемента, при возникновении которого использование объекта по назначению невозможно до восстановления его работоспособности.

Частичный отказ – отказ элемента, при возникновении которого использование объекта по его назначению возможно, но с меньшей эффективностью.

По устойчивости проявлений отказы делят на устойчивые и неустойчивые отказы.

Устойчивым называется отказ, который сохраняется вплоть до его устранения.

Неустойчивые отказы, называемые также самоустраняющимися, непостоянны во времени, то есть наличие их проявлений зависит от времени. Самоустраняющиеся отказы принято классифицировать на сбой и перемежающиеся отказы.

Сбой представляет собой самоустраняющийся отказ, приводящий к кратковременному нарушению работоспособности объекта.

Перемежающийся отказ – многократно возникающий самоустраняющийся отказ (сбой) одного и того же характера.

По характеру проявлений отказа выделяют явные и неявные (скрытые) отказы.

Явные отказы имеют характерные для них внешние проявления. Скрытые же отказы можно выявить только с помощью проведения соответствующих измерений.

По возможности восстановления работоспособного состояния оборудования после возникновения в нем отказа выделяют устранимые и неустранимые отказы.

Кроме того, различают искусственные и естественные отказы. Естественные отказы возникают случайным образом, искусственные же отказы вызываются намеренно.

Естественные отказы на стадии эксплуатации могут быть обусловлены процессами старения радиоэлектронных компонентов (а также процессами износа механических частей), нарушения их режимов работы или неправильного использования оборудования.

Искусственные отказы может потребоваться вызывать при проведении проверки правильности работы системы технической диагностики, а также в ряде других случаев.

Понятие отказа является ключевым при диагностике радиоэлектронных систем. Это обусловлено тем что, как правило, техническое диагностирование проводится с целью предупреждения или выявления состояния отказа, иногда с указанием возможных причин появления отказа (эта задача может решаться за счет применения экспертных систем).

Постепенные отказы радиоэлектронного оборудования можно не только выявлять, но и предупреждать заранее [24]. Наиболее сложно выявить причины неустойчивых отказов, особенно сбоев, так как они представляют собой однократное кратковременное явление. Выявить место возникновения перемежающихся отказов также сложная задача.

1.2. Радиосвязное оборудование и его значение

В настоящее время пилотирование летательного аппарата трудно представить без использования радиоэлектронных средств. Радиоэлектронное оборудование используется на всех этапах полета, начиная с запуска двигателей, во время руления, взлета, набора высоты, горизонтального полета по маршруту, снижения, захода на посадку, во время самой посадки и последующего руления на стоянку, и заканчивая выключением двигателя.

Благодаря применению на самолетах радиоэлектронного оборудования решаются задачи навигации и управления, обеспечивается необходимая безопасность полета.

Бортовое радиосвязное оборудование наряду с радионавигационным и радиолокационным оборудованием предназначено для решения задач пилотирования летательных аппаратов. При этом его важность зачастую недооценивают. Между тем оно играет не последнюю роль на всех этапах полета, и особенно при взлете и заходе на посадку [15].

Обеспечение связи экипажа летательного аппарата со службами управления воздушным движением на этих этапах полета имеет первостепенное значение.

Следует также отметить важность функций выполняемых аварийными радиостанциями, а также аварийными передатчиками для системы КОСПАС/SARSAT, определяющей местоположение (координаты) терпящего бедствие летательного аппарата [59].

Необходимо также сказать, что по результатам ряда статистических исследований было определено, что количество выживших при аварии напрямую зависит от того, насколько быстро придут поисково-спасательные службы к месту происшествия.

Эксплуатационное использование системы поиска и спасения КОСПАС/SARSAT поисково-спасательными службами началось с 1982 г.

С тех пор система была использована во многих поисково-спасательных операциях и обеспечила спасение более 20 тысяч человеческих жизней во всем мире.

Аэронавигационная комиссия ИКАО рекомендовала обязательную установку аварийных передатчиков-указателей местоположения¹, на борту новых воздушных судов начиная с 2002 года, и на всех коммерческих воздушных судах с 2005 года.

Каждое радиосвязное оборудование выполняет определенные функции, и в связи с этим возникает необходимость рассмотрения отдельных типов радиосвязного оборудования, применяемых в настоящее время на самолетах гражданской авиации.

¹ Аварийные передатчики-указатели местоположения должны работать на частоте 406МГц. Аварийные передатчики, предназначенные для работы с системой КОСПАС/SARSAT, работающие на частотах 121,5МГц и 243МГц с 2008 года согласно принятым постановлениям будут выводиться из эксплуатации.

1.3. Виды радиосвязного оборудования

На сегодняшний день на летательные аппараты устанавливаются различные типы связного оборудования, которое можно условно поделить на следующие основные типы:

- радиостанции для осуществления ближней связи;
- радиостанции для осуществления дальней связи;
- аварийные радиостанции;
- передатчики для работы с системой КОСПАС/SARSAT;
- оборудование для спутниковой связи;
- внутрисамолетные средства связи.

Причем следует обратить внимание на условность данной классификации. Некоторые типы радиосвязного оборудования выполнены так, что они с одинаковым успехом могут быть отнесены к нескольким видам одновременно. Например, передатчики для работы совместно с системой КОСПАС/SARSAT могут конструктивно объединяться с аварийными радиостанциями, что зачастую и делается. Или, например, существуют типы связных радиостанций, которые могут работать как в коротковолновом диапазоне частот (используемых для осуществления дальней связи), так и ультракоротковолновом частотном диапазоне (предназначенном для осуществления ближней связи).

Необходимо отметить, что проведение технической диагностики каждого типа радиосвязного оборудования имеет свои особенности, обусловленные функциональным назначением оборудования, принципом его работы, а также рядом других факторов.

Знание принципов работы радиоэлектронного оборудования при создании системы технического диагностирования имеет первостепенное значение [36], так как это позволяет выделить характеристики и параметры радиооборудования, которые наиболее важны для выполнения им своих функций. Знание важности контроля того или иного параметра позволит упростить выбор минимальной совокупности диагностических параметров.

Принципы работы некоторого оборудования, например, передатчиков для системы КОСПАС/SARSAT в существующей литературе освещаются не достаточно хорошо и в настоящей работе приводятся некоторые сведения о работе данной системы.

Проводя анализ работы аварийного радиомаяка для работы с системой КОСПАС/SARSAT нетрудно определить, что первостепенное значение для обеспечения правильной его работы имеет стабильность частоты излучаемых им высокочастотных сигналов (а также формат кода, передаваемого в информационном сигнале).

Ниже кратко рассмотрены применяемые в настоящее время конкретные типы радиосвязного оборудования, с указанием при необходимости особенностей их работы.

1.3.1. Радиостанции ближней связи

Радиостанции для ближней связи¹ предназначены для ведения радиосвязи экипажами воздушных судов между собой и службами управления воздушным движением на расстоянии в пределах около 300км. В настоящее время имеется большое количество видов эксплуатируемых радиостанций ближней связи. Некоторые из них описаны ниже.



Рис.1.2. Радиостанция «Баклан»

Радиостанция «Баклан». Бортовая радиостанция МВ диапазона «Баклан» (см. рис.1.2) [67] предназначена для обеспечения беспойсковой и бесподстроечной радиосвязи экипажами летательных аппаратов между собой и со службами управления воздушным движением. Радиостанция «Баклан» одна из наиболее распространенных радиостанций ближней связи, используемых на сегодняшний день. Радиостанция работает в симплексном режиме, то есть одновременно можно либо передавать, либо принимать.

Существуют два варианта радиостанции «Баклан» – «Баклан-5» и «Баклан-20» (у радиостанции «Баклан-5» выходная мощность передатчика составляет 5 Вт, а у «Баклан-20» – 16 Вт). В состав комплекта радиостанции входят: приемопередатчик, пульт дистанционного управления, амортизационная рама и дополнительный усилитель низкой частоты, который закрепляется снизу на амортизационной раме.

Комплект может быть одинарным или сдвоенным, в случае сдвоенного комплекта в состав радиостанции будут входить по два приемопередатчика, пульта дистанционного управления и дополнительных УНЧ, а амортизационная рама будет сдвоенной. Пульт дистанционного управления может быть удален от радиостанции на расстояние до 40 м.

Управление радиостанцией осуществляется в основном с пульта дистанционного управления и при помощи кнопки «прием-передача», нажатие которой переводит радиостанцию из режима «прием» в режим «передача». Кнопка «прием-передача» располагается на штурвале (или рычаге) управления. Кроме этого к органам управления радиостанцией можно отнести тумблер включения питания радиостанции и регуляторы глубины модуляции и уровня самопрослушивания (регуляторы расположены на передней панели).

Для устранения шумов в головных телефонах, при отсутствии корреспондента на линии связи, в радиостанции предусмотрен подавитель шума. С пульта дистанционного управления осуществляется выбор требуемого канала связи (установка требуемой частоты работы радиостанции), и производится включение/выключение подавителя шума.

Для устранения шумов в головных телефонах, при отсутствии корреспондента на линии связи, в радиостанции предусмотрен подавитель шума. С пульта дистанционного управления осуществляется выбор требуемого канала связи (установка требуемой частоты работы радиостанции), и производится включение/выключение подавителя шума.

¹ Иначе их называют командными радиостанциями.

Частотой работы радиостанции управляют с помощью двух ручек установки частоты. Включение/выключение подавителя шума производится с помощью тумблера «ПШ».

Приемник радиостанции рассчитан на работу с нагрузкой 600 Ом. Для работы радиостанции на головные телефоны предназначен дополнительный УНЧ, который выпускается в двух вариантах – для работы на низкоомные, или высокоомные головные телефоны. Если в СПУ (самолетном переговорном устройстве) имеется свой усилитель низкой частоты, или имеется необходимость работы радиостанции на нагрузку 600 Ом, то радиостанция дополнительным УНЧ не комплектуется.

При отсутствии в СПУ регулятора громкости его устанавливают на пульт дистанционного управления (только при комплектации радиостанции дополнительным УНЧ).



Рис.1.3. Радиостанция «Орлан-85СТ»

Радиостанция «Орлан-85СТ». Авиационная бортовая приемо-передающая радиостанция «Орлан-85СТ» (см. рис.1.3) предназначена для установки на магистральные самолеты гражданской авиации. Радиостанция обеспечивает двустороннюю симплексную речевую связь экипажа самолета со службами УВД и с экипажами других самолетов.

Параметры радиостанций отвечают требованиям ИКАО и позволяют совершать полеты в страны Европы. Радиостанции «Орлан-85СТ» полностью взаимозаменяемы с ранее установленными радиостанциями по установочным размерам, присоединительным разъемам и внешней проводке. В радиостанции предусмотрена довольно развитая система встроенного контроля, с глубиной диагностики до уровня отдельного блока.

Технические характеристики

Диапазон частот

Передача	118 - 137.9917 МГц
Прием	118 - 137.9917 МГц
Шаг сетки частот.....	8.33 / 25 кГц
Стабильность частоты	± 6 ppm
Выходная мощность	25-40 Вт
Подавление внеполосных излучений	90 дБ
Чувствительность, не хуже	1.5 мкВ
Избирательность по побочным каналам.....	80 дБ
Диапазон рабочих температур.....	-55 ~ +55 °С
Наработка на отказ, не менее.....	4000 час
Назначенный ресурс	30 000 час



Рис.1.4. Радиостанция «Юрок»

Радиостанция «Юрок». Бортовая радиостанция МВ-диапазона «Юрок» (см. рис.1.4.) предназначена для установки на машины средней авиации и обеспечения бесперебойной связи экипажей самолетов с диспетчерскими наземными пунктами и переговоров между экипажами самолетов. В радиостанции предусмотрен дополнительный режим работы – возможность контроля сигналов на частоте аварийного канала 121,5 МГц без нарушения основных функций связи. Радиостанция работает с двумя авиагарнитурами, обеспечивает внутреннюю телефонную связь между двумя членами экипажа. Имеется выход для подключения громкоговорителя. При заданных энергетических значениях мощности и чувствительности обеспечивается надежная связь в пределах прямой видимости. Радиостанция изготавливается в двух вариантах – со встроенным пультом и выносным. Предусмотрена глубокая система встроенного контроля, индицирующая неисправный блок, как в бортовых условиях, так и в условиях мастерских. Встроенная система контроля удешевляет и упрощает техническое обслуживание и ремонт. Радиостанция «Юрок» собрана на новой элементной базе и соответствует требованиям ICAO.

Технические характеристики

Диапазон частот	118 ÷ 136,975МГц
Шаг сетки частот.....	8,33/25кГц
Число каналов связи	2278
Стабильность частоты	$5 \cdot 10^{-6}$
Выходная мощность передатчика	10Вт
Подавление побочных каналов приема, не менее	80дБ
Чувствительность приемника, не хуже.....	1,5мкВ
Избирательность по побочным каналам.....	80дБ
Потребление:	
в режиме «прием»	30Вт
в режиме «передача».....	100Вт
Напряжение питания	24 ÷ 29,4В
Аварийное напряжение питания	18 ÷ 33В
Диапазон рабочих температур.....	-55 ÷ +55°С
Влажность (при + 25°С)	98%
Средняя наработка на отказ, не менее	5000час
Масса приемопередатчика, не более.....	1,8кг
Габаритные размеры.....	146×64×219

Радиостанция «Юрок» имеет несколько не самолетных модификаций, – радиостанции «Юрок-А» (автомобильная радиостанция) и «Юрок-Н» (наземная радиостанция).

Комплект автомобильной радиостанции «Юрок-А» предназначен для установки на автомобиле и обеспечения беспойсковой связи с экипажами самолетов и с командными и диспетчерскими наземными пунктами. Питание комплекта радиостанции «Юрок-А» осуществляется от автомобильной бортовой сети постоянным напряжением 12В.

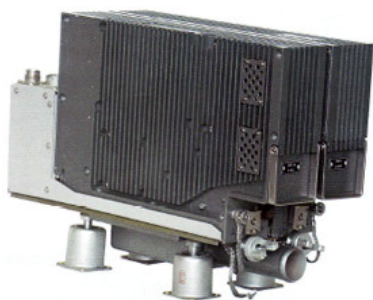


Рис.1.5. Радиостанция «Бурка»

Радиостанция «Бурка». Радиостанция «Бурка» (рис.1.5) является современной радиостанцией ближней связи¹. Радиостанция обеспечивает устойчивую работу в сложной электромагнитной обстановке с помощью режима ППРЧ, перепрограммирования и повышенной скорости передачи данных. В радиостанции применена цифровая обработка сигнала, что позволяет изменением программного обеспечения вводить новые режимы работы с минимальными затратами.

Управление режимами может осуществляться как от пульта управления, так и от комплекса связи. Радиостанция может размещаться в негерметизированных отсеках при пониженном атмосферном давлении и сохранять работоспособность при температурах от -55° до $+60^{\circ}\text{C}$. Радиостанция соответствует международному стандарту ISO-9001. В радиостанции имеется развитая система встроенного автоконтроля работоспособности.



Рис.1.6. Радиостанция «Лунь-1Э (2Э)»

Радиостанции «Лунь-1Э» и «Лунь-1Э». Эти радиостанции (см. рис.1.6) военного назначения. Они предназначены для обеспечения устойчивой радиосвязи в сложной электромагнитной обстановке. Радиостанции устанавливаются на самолетах «Су» и «Миг». Радиостанции могут размещаться в негерметизированных отсеках при пониженном атмосферном давлении и сохранять работоспособность при температурах от -55° до $+60^{\circ}\text{C}$. В радиостанциях предусмотрена достаточно развитая система встроенного контроля.

Кроме рассмотренных выше радиостанций для ближней связи используются также и другие, однако, так как цель данной диссертационной работы заключается не в рассмотрении существующего оборудования для ведения ближней радиосвязи, а в создании системы для проведения его диагностики, то описание их характеристик будет излишним.

¹ Материал взят с сайта <http://www.aeroreview.ru>.

1.3.2. Радиостанции дальней связи

Радиостанции дальней связи предназначены для обеспечения радиосвязью на расстояниях свыше 300 км. Радиостанции дальней связи работают в диапазоне коротких волн ($2 \div 24$ МГц). На сегодняшний день на самолетах устанавливаются различные виды радиостанций дальней связи, например: «Микрон», «Ядро-1», «Ядро-2», Р-805КЗМ-01 и др.



Рис.1.7. Радиостанция «Микрон»

Радиостанция «Микрон». Радиостанция дальней связи «Микрон» (см. рис.1.7) предназначена для обеспечения симплексной бесперехватной и бесподстроечной связи экипажа ЛА с экипажами других самолетов и службами УВД. Радиостанция работает в КВ диапазоне на частотах от 2 до 23,9999 МГц с шагом сетки частот 100 кГц, то есть обеспечивает 220000 каналов свя-

зи. Радиостанция «Микрон» работает в радиотелефонных и радиотелеграфных режимах.

Конструктивно радиостанция состоит из приемопередатчика и выносных устройств. Приемопередатчик состоит из нескольких функционально законченных блоков – датчика опорных частот, приемовозбудителя, усилителя мощности, прибора питания датчика опорных частот и приемовозбудителя. Все блоки приемопередатчика установлены на общей амортизационной раме имеющей встроенную распределительную коробку.

Управление радиостанцией осуществляется с пульта дистанционного управления, который может находиться на расстоянии до 50м от радиостанции.

Технические характеристики

Диапазон частот	2 ÷ 24МГц
Дискретность сетки частот	100Гц
Стабильность частоты	$0,5 \cdot 10^{-6}$
Пиковая мощность передатчика.....	400Вт
Чувствительность приемника	1 ÷ 5мкВ
Время перестройки частоты.....	26с
Ослабление высших гармоник и комбинационных составляющих передатчика	40дБ
Ослабление сигналов по промежуточным частотам и по зеркальному каналу	60дБ
Напряжение питания переменного тока	115В или 200В, 400Гц
постоянного тока.....	27В



Рис.1.8. Радиостанция «Ядро-1»

Радиостанция «Ядро-1». Радиостанция «Ядро-1» (рис.1.8) предназначена для жестких условий эксплуатации и обеспечения дальней телефонной и телеграфной радиосвязи между самолетами, вертолетами и наземными пунктами управления авиации. Состав радиостанции: приемопередатчик, амортизационная рама, АСУ, комплект ЭТД, пульт управления.

Технические характеристики

Диапазон частот (прием/передача).....	2 ÷ 18МГц
Шаг сетки частот.....	100Гц
Чувствительность в CW, SSB, AFSK,	не хуже 3мкВ
в АМ,	не хуже 5мкВ
Выходная мощность	не менее 100 Вт (2-12 МГц)
.....	не менее 50 Вт (12-18 МГц)
Напряжение питания	27 (+2,4/-3)В
Потребляемая мощность не более.....	570Вт
Наработка на отказ не менее.....	1200час.
Габаритные размеры приемопередатчика	463×252×203мм
Вес	23кг

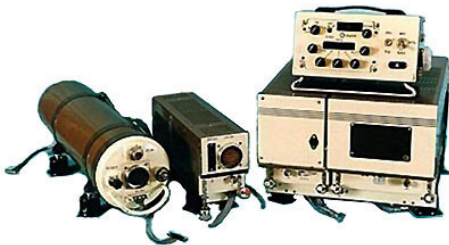


Рис.1.9. Радиостанция «Ядро-2»

Радиостанция «Ядро-2А1-Л1». Бортовая радиостанция «Ядро-2» (см. рис.1.9) предназначена для жестких условий эксплуатации и обеспечения телефонной и телеграфной дальней радиосвязи между самолетами, вертолетами и наземными пунктами управления авиации во всем диапазоне КВ [83].

Технические характеристики

Диапазон частот (прием/передача).....	2-30МГц
Шаг сетки частот.....	100Гц
Чувствительность:	
в CW и SSB (в АМ), не хуже	3мкВ (5мкВ)
Тип излучения	АМ (А3Е), SSB (J3Е), CW (А1А)
Выходная мощность не менее	400 Вт
Напряжение питания	200 (-13/+6)В, 400Гц
.....	27(-2.7/+2.7)В
Наработка на отказ не менее.....	1200час

1.3.3. Аварийные радиостанции

Аварийные радиостанции предназначены для обеспечения радиосвязи между экипажем ЛА потерпевшего аварию и поисково-спасательными службами. Устанавливаемые на сегодняшний день радиостанции бывают нескольких типов, а некоторые из них способны работать и с международной системой поиска и спасения КОСПАС/SARSAT.



Рис.1.10. Аварийная радиостанция P-855A1/P-855A1(Y).

Радиостанция P-855A1/P-855A1(Y). Радиостанции P-855A1/P-855A1(Y) (см. рис.1.10) предназначены для обеспечения радиосвязи членов экипажа, потерпевшего бедствие самолета (вертолета) с поисково-спасательными службами. В комплект радиостанции входят: сама радиостанция, батарея, антенна, ремни, чехол, комплект ЭТД. Радиостанция имеет два вида работ: радиотелефон в режиме «связь», и радиомаяк с модуляцией свип-тоном в режиме «маяк».

Радиостанция выполнена в герметичном корпусе, работает с внутренним микрофоном или со шлемофоном. Радиостанция P-855A1Y предназначена для учебных целей при подготовке специалистов поисково-спасательных служб [80].

Технические характеристики

Рабочие частоты	121,5 МГц и 243 МГц/114,583МГц
Мощность передатчика, не менее	100мВт
Напряжение питания, от батареи «Прибой-2С»	8,5В
Время непрерывной работы от одной батареи:	
в режиме «прием-передача» (режиме «маяк»).....	60ч (24ч)
Интервал рабочих температур	-50 ... +60°C
Габариты	130 × 68 × 32мм
Вес полного комплекта	1000г



Рис.1.11. Аварийная радиостанция P-855A2.

Радиомаяк P-855A2. Малогабаритный авиационный аварийно-спасательный радиомаяк P-855A2 (рис.1.11) предназначен для подачи сигналов бедствия на международных частотах и привода поисковых средств к месту аварии. Радиомаяк P-855A2 может применяться автономно или в составе автоматического маяка КОМАР. Состав: Радиостанция, батарея, антенна, ремни, чехол, комплект ЭТД.

Технические характеристики

Рабочие частоты.....	121,5 и 243МГц
Мощность передатчика, не менее	100мВт
Напряжение питания, от батареи Прибой-2С	8,5В
Время непрерывной работы от одной батареи.....	36ч
Интервал рабочих температур.....	-60 ÷ +65°С
Габариты	130 × 68 × 32мм
Вес полного комплекта.....	800г



Рис.1.12. Аварийные радиостанции P-855A1M и P-855A2M.

Аварийные радиостанции-маяки P-855A1M, P-855A1M1 и P-855A2M. Поисково-спасательные радиостанции-радиомаяки P-855A1M, P-855A1M1 и P-855A2M (рис.1.12) предназначены для определения местоположения и обеспечения организации поиска экипажей потерпевших аварию самолетов и вертолетов. Указанные радиостанции-радиомаяки работают также и системой КОСПАС/SARSAT.

Состав P-855A1M: спутниковый передатчик сигналов бедствия работает на частоте 406,028МГц; антенна; передатчик ближнего привода, в режиме «Маяк» подает тональный сигнал поисково-спасательным службам; приемопередатчик (для связи с поисково-спасательными службами на частоте 121,5МГц). P-855A1M1 дополнительно оснащена навигационным приемником, и обеспечивает определение местоположения при работе с системой КОСПАС/SARSAT с точностью до 100м. Имеется дисплей, позволяющий членам экипажа определять координаты своего местоположения.

Состав P-855A2M: спутниковый передатчик сигналов бедствия, работающий на частоте 406,028МГц; передатчик ближнего привода, работающий на частоте 121,5 МГц в режиме «Маяк»; антенна. Радиомаяк обеспечивает подачу сигналов бедствия, как через систему КОСПАС/SARSAT, так и поисково-спасательным службам в режиме «Маяк».

Технические характеристики

Параметр	P-855A1M	P-855A1M1	P-855A2M
Рабочие частоты, МГц	121,5/406,028	121,5/406,028 и 1575	121,5/406,028
Мощность передатчика, Вт	0,1/5	0,1/5	0,1/5
Чувствительность приемника, мкВ (на частоте 121,5МГц)	5	5	–
Время непрерывной работы, час	48/24	48/24	48/24
Рабочая температура, °С	-40...+50	-40...+50	-40...+50

1.3.4. Передатчики для системы КОСПАС/SARSAT

Система КОСПАС/SARSAT¹ – спутниковая система для поиска потерпевших аварию летательных аппаратов, морских судов, а также наземных объектов.

Система КОСПАС/SARSAT состоит из наземной части, космической части и аварийных радиомаяков [58]. Аварийные маяки устанавливаются на борт летательного аппарата, они собственно и представляют собой объект технического диагностирования. Вообще в системе КОСПАС/SARSAT различают три типа аварийных радиомаяков:

- ELTs (Emergency Locator Transmitters) – самолетные аварийные передатчики
- EPIRBs (Emergency Position Indicating Radio Beacons) – морские аварийные радиобуи
- PLBs (Personal Locator Beacons) – наземные переносные аварийные радиомаяки

Маяки работают на частотах 121,5 МГц, 243МГц и 406МГц. Радиомаяки, работающие на частоте 406МГц более предпочтительны, так как обеспечивают более высокую точность определения координат бедствующего летательного аппарата [57]. Кроме того, согласно сведениям, приведенным на официальной сайте системы КОСПАС/SARSAT, с 2008 года работа будет осуществляться только на этой частоте [84, 85].

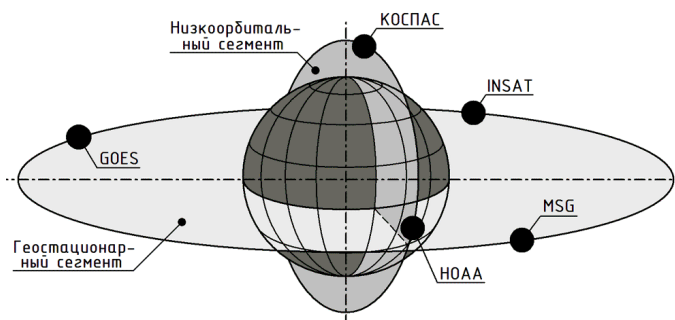


Рис. 1.13. Космический сегмент системы КОСПАС/SARSAT.

Космическая часть системы состоит из низкоорбитального и геостационарного сегментов (см. рис. 1.13). Принцип работы низкоорбитального сегмента системы КОСПАС/SARSAT весьма схож с работой доплеровских навигационных систем [22].

Отличие состоит в том, что излучает сигнал не спутник, а аварийный радиомаяк, который включается при аварии автоматически или вручную. Спутники низкоорбитального сегмента находятся на околополярных орбитах с высотой (800 ÷ 1000) км.

С помощью геостационарных спутников производить подобные измерения не возможно. Для работы с геостационарными спутниками используются аварийные радиомаяки со встроенными навигационными приемниками (например, GPS приемниками) или

¹ Название КОСПАС/SARSAT состоит из двух аббревиатур:

КОСПАС – космическая система поиска аварийных судов;

SARSAT – search and rescue satellite-aided tracking (спутниковая система слежения для поиска и спасения).

маяки, имеющие возможность подключения внешнего навигационного приемника. При этом информация о координатах аварийного радиомаяка передается в его сигнале.

Сигнал от аварийного радиомаяка принимается на спутнике, где происходит его частичная обработка. После этого сигнал ретранслируется спутником на наземные станции слежения LUT (Local User Terminal), осуществляющих вычисление текущих координат аварийного радиомаяка. С наземных станций слежения информация передается в центры поиска и спасения, из которых координаты места бедствия поступают в поисково-спасательные службы, которые направляются непосредственно к месту аварии.

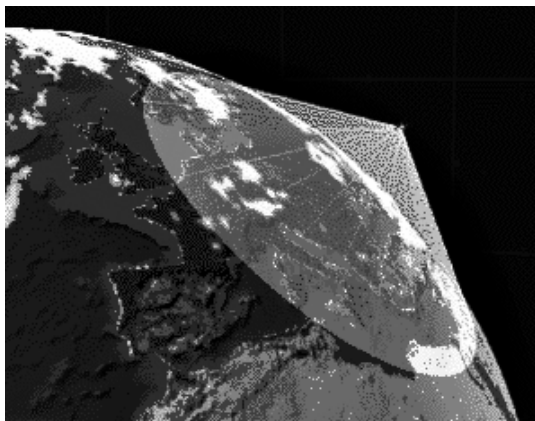


Рис. 1.14. Пролет спутника над участком земной поверхности

Взаимное движение спутника и аварийного радиомаяка описывается довольно громоздкими уравнениями, и поэтому введем следующую упрощенную модель (рис.1.15).

Рассмотрим движение на том участке, когда он пролетает мимо аварийного передатчика (см. рис.1.14), при этом, так как расстояния на рассматриваемом участке относительно малы, то можно пренебречь кривизной траектории (а также кривизной Земли) спутника и считать ее прямой линией. Опустим также факт вращения Земли вокруг своей оси, то есть $W_0 = 0$.

Определение дальности до аварийного радиобуя с помощью низкоорбитальных спутников осуществляется дифференциальным доплеровским методом¹.

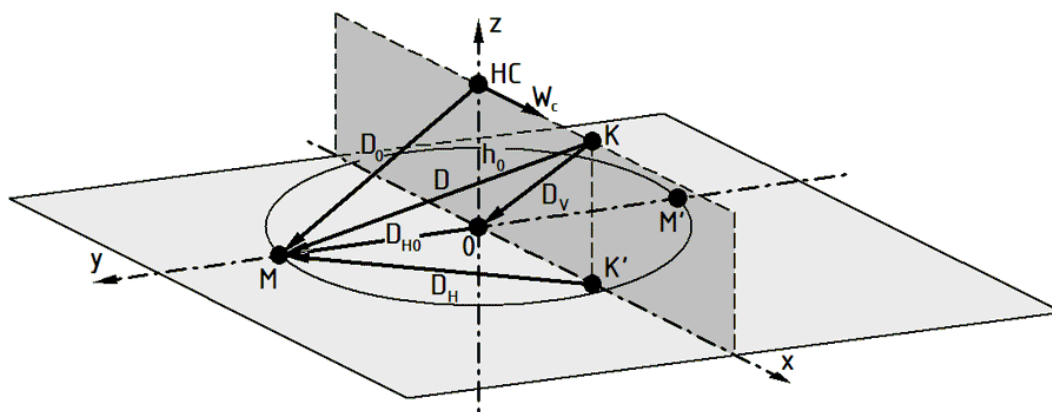


Рис. 1.15. Определение местоположения дифференциальным способом.

Доплеровский сдвиг частоты определяется выражением²

$$F_D = -\frac{1}{\lambda_0} \cdot W_r = -\frac{1}{\lambda_0} \cdot \frac{dD}{dt}$$

¹ Дифференциальный доплеровский метод определения координат также известен как траверсный.

² Подробный вывод не приводится, так как это не относится напрямую к теме диссертационной работы.

Дифференцируя доплеровскую кривую в окрестностях точки t_0 , будем иметь

$$\left. \frac{dF_D}{dt} \right|_{t=t_0} = -\frac{1}{\lambda_0} \cdot \left. \frac{d^2 D}{dt^2} \right|_{t=t_0} = -\frac{W_c^2}{\lambda_0} \sqrt{\frac{1}{D_{H0}^2} + \frac{1}{h_0^2}}$$

Из последнего выражения видно что, при известных параметрах движения спутника, путем дифференцирования доплеровской кривой в окрестностях точки t_0 (момент пролета маяка) можно определить дальность до аварийного радиобуя.

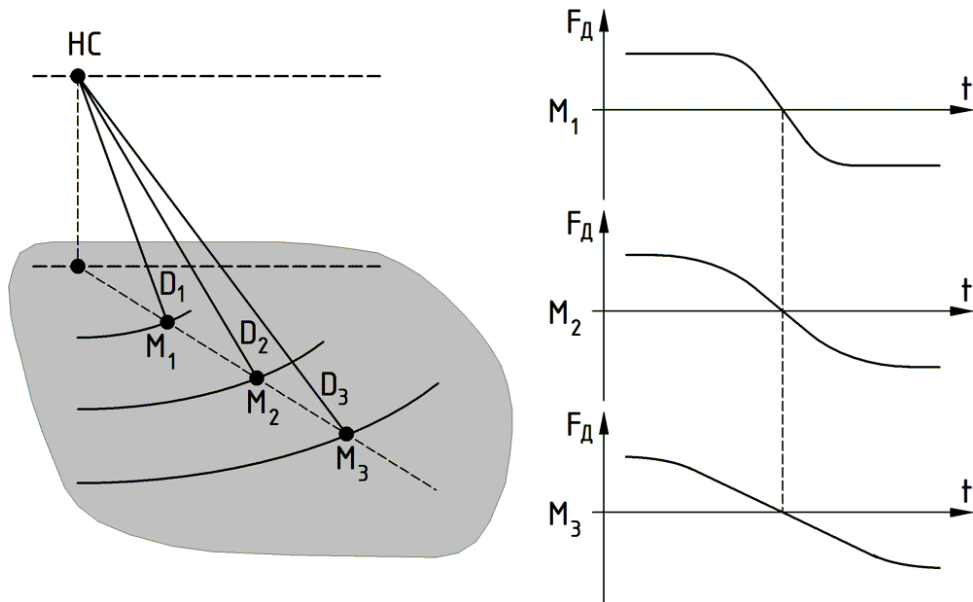


Рис. 1.16. К пояснению дифференциального доплеровского способа определения координат аварийного радиобуя.

Графически это поясняется на рис. 1.16. На рисунке показаны три графика изменения доплеровской частоты при различной дальности до аварийного передатчика. Видно, что чем больше расстояние от спутника до аварийного передатчика, тем меньше крутизна полученной доплеровской кривой. При определении местоположения аварийного радиомаяка точек положения будет две (M и M') – одна из них расположена зеркально относительно проекции траектории пролета спутника на земную поверхность. Эта неоднозначность можно разрешить при пролете спутника по другой траектории или учитывая вращение Земли, но это достигается только при маяках работающих на частоте 406МГц.

Аварийно-спасательный радиомаяк АРМ-406П. Автоматический переносной радиомаяк АРМ-406 П¹ (см. рис.1.17) предназначен для определения координат терпящих бедствие воздушных судов с помощью передачи информации через ИСЗ системы КОСПАС/SARSAT, а также обеспечения привода поисковых средств к месту аварии. АРМ размещается в салоне воздушного судна с возможностью быстрого использования в аварийной обстановке. Аварийно-спасательный радиомаяк АРМ-406П представляет собой

¹ Тип радиомаяка ELT(AP)

моноблок, состоящий из двойного защитного кожуха с установленными в нем амортизаторами, датчиком перегрузки и переносным моноблоком АС1. В состав радиомаяка входит также пульт дистанционного управления, устанавливаемый в кабине экипажа и внешняя антенна АНТ-406В, устанавливаемая на корпусе воздушного судна.



Рис.1.17. Передатчик «АРМ-406П»

Моноблок АС1 собственно и есть переносной радиомаяк, включающий передатчики ПРД-406 и ПРД-121, программно-временное устройство, пульт дистанционного управления (ПДУ), блок питания и антенну.

Аварийный режим работы моноблока АС1 может быть включен как от ПДУ, так и от датчика перегрузки, а также может производиться вручную при извлечении его из защитного кожуха при покидании аварийного ВС.

Технические характеристики

Несущая частота:

ПРД-406 406,025 МГц

ПРД-121 121,5 МГц

Мощность:

ПРД-406 5,0 Вт

ПРД-121 0,1 Вт

Нестабильность частоты:

долговременная, в течение 5 лет ± 5 МГц

кратковременная, за 0,1 сек $2 \cdot 10^{-9}$

Период излучения посылок ПРД-406 50 сек

Длительность посылки ПРД-406 440 мс

Диапазон рабочих температур¹ $-40^{\circ}\text{C}(-55^{\circ}\text{C}) \dots +55^{\circ}\text{C}(+85^{\circ}\text{C})$

Время непрерывной работы:

на $f = 406,025$ МГц, не менее 24 часов

на $f = 121,5$ МГц, не менее 48 часов

Массогабаритные характеристики (размеры/вес):

моноблок "П" 180×184×290 мм/3,8 кг

Переносной моноблок АС1 77×82×190 мм/1,7 кг

Антенна радиомаяка АНТ-406В - выполнена в виде крыла (сечение – удлиненная капля) длиной 235 мм и максимальной толщиной 22 мм, имея при этом вес 0,7 кг

¹ В скобках указано предельное значение температур.



Рис.1.18. Передатчик «АРМ-406АС1»

Аварийно-спасательный радиомаяк АРМ-406АС1. Аварийно-спасательный радиомаяк АРМ-406АС1 (см. рис.1.18) предназначен для определения координат терпящих бедствие воздушных судов с помощью передачи информации через спутники системы КОСПАС/SARSAT, а также для обеспечения привода поисковых служб к месту аварии. Аварийный радиомаяк размещается в салоне воздушного судна с возможностью быстрого использования в аварийной обстановке.

Аварийно-спасательный радиомаяк АРМ-406АС1 представляет собой моноблок, состоящий из защитного кожуха, устанавливаемого в салоне воздушного судна и помещенного в него герметичного моноблока АС1. Моноблок АС1 и представляет собственно переносной радиомаяк, включающий два передатчика (ПРД-406 и ПРД-121), программно-временное устройство, пульт управления, блок автономного питания и антенну.

Моноблок АС1 легко извлекается из кожуха при покидании аварийного воздушного судна. Включение аварийного радиомаяка АРМ-406АС1 осуществляется вручную.

Технические характеристики

Несущая частота.....	406,025МГц/121,5МГц
Мощность:	
ПРД-406	5,0 Вт
ПРД-121	0,1 Вт
Нестабильность частоты:	
долговременная (в течение 5 лет).....	± 5 МГц
кратковременная (за 0,1 сек).....	$2 \cdot 10^{-9}$
Период излучения посылок ПРД-406	50 сек
Длительность посылки ПРД-406	440 мс
Диапазон рабочих температур: -40°C (-55°C ¹) ... +55 °C (+85°C)	
Время непрерывной работы на 406,025 (121,5)МГц, не менее	24 (48) часов
Массогабаритные характеристики:	
размеры	91x110x220 мм
вес	2,4 кг
вес переносного моноблока АС1.....	1,7 кг

¹ В скобках указано предельное значение температур.

1.3.5. Внутрисамолетные средства связи

Внутрисамолетные средства связи предназначены для ведения внутренней и внешней радиосвязи экипажа, прослушивания звуковых специальных и радионавигационных сигналов, а также для оповещения пассажирского салона.



Рис.1.19. Самолетное переговорное громкоговорящее устройство СПГУ-35



Рис.1.20. Самолетное переговорное устройство СПУ-200

Примером оборудования этого типа могут служить самолетные переговорные устройства с громкоговорящей связью СПГУ-35, СПУ-200 (см. рис.1.19 и рис.1.20). Изделия обеспечивают: внутреннюю связь между экипажем и с наземным обслуживающим персоналом; выход на внешнюю радиосвязь через одну из пяти радиостанций; прослушивание до 12 сигналов радионавигационных устройств и 8 сигналов специального назначения; громкоговорящее оповещение экипажем пассажирского салона; отдельную регулировку громкости сигналов внутренней и внешней громкоговорящей связи; сопряжение с аппаратурой документирования и контроля; сопряжение с аппаратурой внешнего громкоговорящего оповещения;

Основные технические характеристики

Наименование параметра изделия	СПГУ-35	СПУ-200
Количество членов экипажа во внутренней связи	4 ÷ 3	5 ÷ 3
Количество радиостанций внешней радиосвязи	До 5	До 5
Количество прослушиваемых РНУ и ДСС	8 и 8	8 и 8
Диапазон частот трактов внутренней и внешней связи, Гц	300 ÷ 4000	300 ÷ 4000

1.3.6. Оборудование спутниковой связи



Рис.1.21. Спутниковый телефон.

Оборудование спутниковой связи на гражданских самолетах представлено в основном телефонами для спутниковой связи (см. рис.1.21). Как правило, диагностику этих устройств не проводят, или проводят только испытание на способность выполнять заданные функции.

На этом рассмотрение типов имеющегося радиосвязного оборудования можно закончить и перейти к рассмотрению процессов технического диагностирования радиоэлектронного оборудования, являющихся предметом исследования данной работы.

Глава 2. Техническое диагностирование радиоэлектронного оборудования

Под технической диагностикой радиоэлектронного оборудования следует понимать совокупность методов и технических средств, назначением которых является получение информации о техническом состоянии радиоэлектронного оборудования [24]. Определение технического состояния исследуемого радиоэлектронного устройства с требуемой для поставленных задач точностью называется техническим диагностированием.

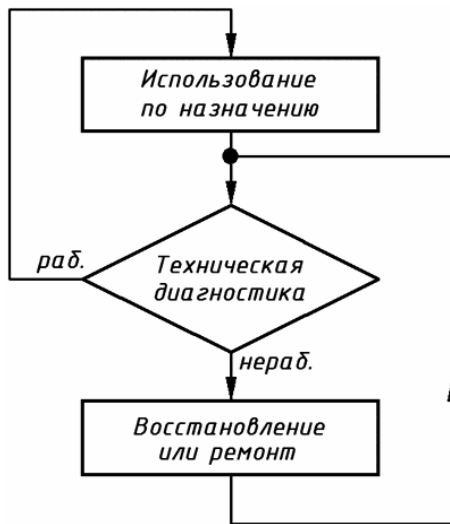


Рис.2.1. Диагностика в составе системы технического обслуживания и ремонта радиоэлектронного оборудования.

Техническая диагностика, как уже отмечалось в Главе.1 данной диссертационной работы является неотъемлемой частью системы технического обслуживания и ремонта. Она является промежуточным звеном между использованием радиоэлектронного оборудования по прямому назначению и процессами технического обслуживания и ремонта (см. рис.2.1).

Техническая диагностика сама по себе не является конечной целью, она предназначена для повышения уровня надежности радиоэлектронного оборудования и эффективности его эксплуатации (особенно при техническом обслуживании) в соответствии с требованиями, предъявляемыми к безопасности полетов.

Системы технической диагностики с развитием теоретической и технической базы решают все более широкий круг задач. Перечислим некоторые основные задачи, которые может выполнять современная диагностическая система:

- проверка состояния работоспособности объекта;
- выявление снижения функционирования;
- поиск неисправного элемента (места отказа);
- выдача рекомендаций по устранению неисправности;
- прогнозирование дальнейшего состояния системы;
- автоматизацию документирования процессов контроля и ремонта.

Одной из главных задач диагностической системы является определение работоспособного состояния диагностируемой системы [25], особенно это проявляется в достаточно простых системах встроенного контроля, которые часто могут решить только ее одну. Это обусловлено несколькими факторами, которые мы сейчас рассмотрим:

– понятие работоспособного состояния является строго регламентированным, и закрепляется техническими условиями на данное радиоэлектронное изделие;

– диагностирование сложной радиоэлектронной аппаратуры связано с существенными временными затратами, поэтому совокупность параметров стараются брать по возможному минимуму, который определяется работоспособным состоянием;

– определение неработоспособного состояния является одним из ключевых моментов проведения диагностики, так как с этой точки алгоритм диагностирования может разветвляться. То есть начинается этап поиска и локализации места отказа, а затем возможно выдача рекомендаций по его устранению и т.д.

Помимо определения текущего технического состояния радиоэлектронного оборудования основными задачами диагностики являются также поиск места возникновения отказа и прогнозирование технического состояния на определенное время.

Примерно в середине прошлого века техническая диагностика начала выделяться как самостоятельная научная дисциплина. Техническую диагностику как самостоятельную научную дисциплину можно условно поделить на три отдельных подраздела:

- техническая генетика;
- техническая диагностика;
- техническая прогностика.

Техническая генетика подразумевает определение предыдущего состояния радиоэлектронного оборудования по данным, полученным в текущий момент времени. К объекту изучения технической генетики можно также отнести и формирование статистических данных по отказам элементов радиоэлектронного оборудования и т.д.

Техническая диагностика предполагает определение текущего состояния объекта диагностирования по результатам измерений диагностических параметров. Часто в процессе определения текущего состояния радиоэлектронной системы используют также и информацию о предыдущем техническом состоянии, особенно при построении адаптивных алгоритмов проведения технического диагностирования.

Техническая прогностика имеет своей целью прогнозирование технического состояния объекта диагностирования. Прогнозирование представляет собой процесс определения с заданной точностью технического состояния объекта диагностирования в последующий период времени, по данным о текущем и предыдущем состояниях объекта.

На практике все эти разделы разделить очень сложно, так как они очень сильно связаны между собой, и зачастую перетекают один в другой, либо пересекаются.

В связи с многообразием существующих в настоящее время систем технического диагностирования возникает потребность в их классификации.

Классификация систем технического диагностирования осуществляется по многим критериям [33, 34], например, по характеру взаимодействия средств диагностирования с объектом технической диагностики (или, иначе говоря, в зависимости от вида диагностирования) их принято делить на системы с тестовым и функциональным диагнозом.

Помимо деления систем технического диагностирования в зависимости от вида диагностирования их принято классифицировать по степени автоматизации, совокупности решаемых задач, составу средств технического диагностирования и т.д.

По степени автоматизации выделяют следующие системы диагностики:

- не автоматизированные (или ручные) системы, в которых вся информация выделяется и обрабатывается человеком-оператором;
- автоматизированные системы, в которых частично выполняется выделение и обработка диагностической информации в автоматическом режиме, а частично человеком;
- автоматические системы диагностирования, способные выполнять сбор и обработку диагностической информации без участия человека.

По степени интеграции с объектом диагностирования различают внешние и встроенные системы диагностики, а также системы смешанного типа.

В зависимости от используемых средств технического диагностирования различают системы диагностики с универсальными средствами (например, с применением персонального компьютера) и специализированными средствами. К специализированным системам технического диагностирования относятся практически все системы встроенного контроля радиоэлектронного оборудования, используемые в настоящее время.

Надо отметить, что система технического диагностирования может быть и смешанного типа. В данной диссертационной работе предлагается использовать комплексную систему технического диагностирования, включающую в себя устройство встроенного контроля и связанный с ним персональный компьютер. Устройство встроенного контроля должно быть при этом построено с использованием средств микропроцессорной техники.

Кроме классификации по выше приведенным критериям системы технического диагностирования подразделяют по степени охвата на общие и локальные системы [24].

Под локальными при этом понимают системы технического диагностирования, способные решить одну или несколько задач диагностики, например, только определение технического состояния без его прогнозирования и поиска места отказа.

Под общими понимают системы решающие все поставленные задачи технического диагностирования. Тут можно отметить что такое разделение весьма и весьма условно, так как перечень задач решаемых технической диагностикой постоянно расширяется.

Существуют также и другие классификации систем технической диагностики.

2.1. Виды технического диагностирования

Системы технического диагностирования подразделяют на две большие группы – это системы функционального диагностирования и системы тестового диагностирования.

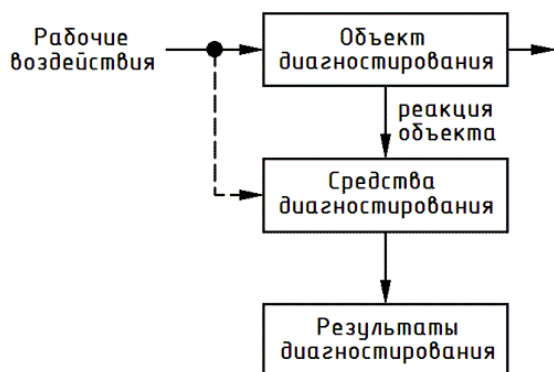


Рис.2.2. Функциональное диагностирование.

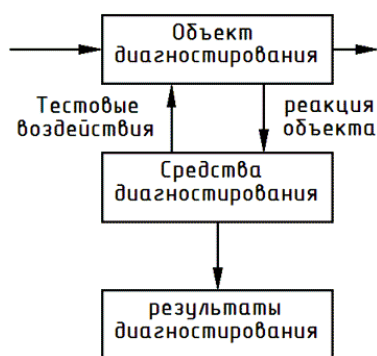


Рис.2.3. Тестовое диагностирование.

Функциональное техническое диагностирование [54] осуществляется в рабочих условиях, т.е. когда на объект диагностирования подаются рабочие воздействия (рис.2.2).

Анализ ответной реакции объекта диагностирования на эти воздействия позволяет делать вывод о его техническом состоянии.

В некоторых случаях рабочие воздействия могут подаваться и на средства технического диагностирования (например, для автоматического определения рабочего сигнала поданного на объект диагностирования и сравнения его ответной реакции с той, которая должна быть при заданном воздействии).

Преимуществом функционального диагностирования является то, что оно проводится

в рабочем состоянии объекта при использовании его по прямому назначению [54]. Это позволяет средствам диагностирования мгновенно отреагировать на нарушение функционирования объекта и осуществить соответствующие действия (например, включить резерв, если таковой имеется, или выдать сигнал о неисправности объекта и т.д.).

Однако функциональное диагностирование обладает некоторыми недостатками. К ним можно отнести недостаточную глубину диагностирования объекта вследствие ограниченности набора рабочих воздействий. Кроме того, в некоторых случаях эти воздействия имеют случайный характер (примером может служить сигнал, принимаемый связной радиостанцией) и заранее неизвестны.

Тестовое диагностирование (см. рис.2.3) заключается в воздействии на объект диагностирования определенными тестовыми сигналами с последующим анализом его ответной реакции на эти сигналы.

Тестовое диагностирование может проводиться как при использовании объекта только для задач его диагностирования, так и при использовании его по прямому назначению, в том случае если тестовые воздействия этому не мешают.

Тестовые воздействия могут подаваться на основные входы объекта диагностирования, которые необходимы при использовании его по прямому назначению, или на дополнительные входы, предназначенные специально для решения задач диагностики.

Единовременное воздействие на объект (тестовое или рабочее) и получаемую при этом ответную реакцию называют элементарной проверкой [54]. При этом ответные реакции объекта диагностирования могут быть получены с нескольких контрольных точек, и количество элементарных проверок определится числом ответных реакций.

Совокупность тестовых воздействий необходимых для определения технического состояния объекта диагностирования и последовательность их выполнения называют диагностическим тестом. При этом различают несколько типов тестов, например контрольный тест, предназначенный для определения работоспособности объекта, или тест поиска отказа, применяемый при определении места возникновения неисправности.

Диагностический тест характеризуется несколькими определяющими параметрами. Основным из этих параметров является длина теста диагностирования [24], которая определяется совокупностью элементарных тестовых воздействий (элементарных проверок)

$$\bar{L} = L\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

Особое значение при создании системы технического диагностирования, если она использует тестовый диагноз, приобретает проблема минимизации совокупности набора элементарных тестовых воздействий (тестовых сигналов), достаточных для проведения качественной и эффективной диагностики радиоэлектронного оборудования.

Немаловажную роль в этом случае играет проблема выбора генератора специальных тестовых сигналов, а также эффективных методов обработки полученных ответных реакций объекта технического диагностирования на эти воздействия.

Первая из этих проблем настоящей диссертационной работе решается за счет применения в системе технической диагностики микросхем синтезаторов частоты с прямым цифровым синтезом, позволяющих легко решить поставленные диагностические задачи¹.

Некоторые методы обработки диагностических сигналов рассматриваются в четвертой главе данной диссертационной работы, где выполняется их сравнительный анализ.

Для проведения операций диагностики предлагается использовать синхронное детектирование сигналов, которое легко осуществить на современной элементной базе.

В следующем разделе диссертации описываются используемые в настоящее время методы диагностирования, производится их классификация и анализ некоторых методов.

¹ Более подробно о данных синтезаторах написано в разделе 3.1, а об их непосредственном применении в системе технической диагностики в четвертой главе данной диссертационной работы.

2.2. Методы технического диагностирования

В настоящий момент применяется огромное количество самых различных методов диагностирования. Соответственно довольно широкая и классификация методов диагностирования. Например, по характеру взаимодействия с объектом технического диагностирования можно выделить контактные и бесконтактные методы диагностики.

По характеру измеряемых при диагностировании величин выделяют две больших подгруппы методов технического диагностирования – физические и параметрические.

Физические методы технического диагностирования базируются на измерении характеристик физических явлений сопровождающих функционирование диагностируемого объекта. Такими характеристиками могут служить температура воздуха внутри аппаратуры или температура корпуса отдельного элемента (например, транзистора выходного каскада передатчика), мощность радиоизлучения, интенсивность оптического излучения и др.

Параметрические методы технического диагностирования [54] основаны на измерении параметров непосредственно самого объекта диагностирования – его входных и выходных сигналов, различных внутренних свойств и параметров, которые точно указывают на характер функционирования данного объекта.

По характеру протекания процесса диагностики методы диагностирования подразделяют на динамические и статические методы диагностики.

Динамические методы предусматривают измерение параметров объекта в не установившемся режиме, при этом используются его динамические характеристики.

Статические методы диагностирования, как следует из их названия, основаны на измерении параметров объекта диагностирования в установившемся режиме работы.

Можно также выделить активные и пассивные методы диагностирования.

Активные методы предусматривают подачу на объект диагностирования определенных тестовых воздействий, с последующим анализом ответной реакции.

Пассивные методы характерны тем, что специальные воздействия на объект диагностирования не подаются, и измеряются те его параметры, по которым можно определить характер его функционирования в рабочем состоянии. Примером применения данного метода может служить измерение амплитуды питающего напряжения, никаких дополнительных тестовых воздействий при этом на диагностируемую аппаратуру не подается.

Особый интерес вызывают интегральные методы технической диагностики, которые являются разновидностью динамических методов диагностирования.

Из них наиболее перспективными представляются методы диагностирования на основе ортогонального анализа ответной реакции диагностируемого объекта на заданное

тестовое воздействие (иными словами анализ выходного сигнала объекта диагностирования с помощью преобразования Фурье), а также диагностика технического состояния с использованием белого шума как тестового воздействия на объект диагностирования [33].

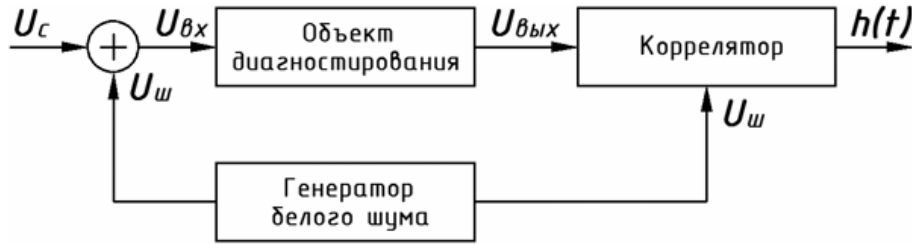


Рис.2.4. Диагностирование белым шумом.

Интегральный метод диагностики на основе белого шума основан на корреляционном анализе. Известно, что автокорреляционная функция для белого шума

$$B_S(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} U_{ш}(t)U_{ш}(t \pm \tau)dt \quad (2.1)$$

где $U_{ш}$ – напряжение белого шума на входе объекта диагностирования, равна нулю во всех точках кроме точки $\tau = 0$, где функция умножается сама на себя.

Взаимосвязь между входным и выходным сигналом объекта диагностирования через отклик $h(t)$ выражается следующим известным соотношением

$$U_{вых} = \int_{-\infty}^{\infty} U_{вх}(t - \tau)h(\tau)d\tau \quad (2.2)$$

Известно, что взаимную корреляционную функцию входного и выходного сигналов системы можно выразить через автокорреляционную функцию и отклик системы

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} B_S(\tau - t)h(t)dt \quad (2.3)$$

Поменяв в последнем выражении (2.3) местами переменные t и τ , получим

$$R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} B_S(t - \tau)h(\tau)d\tau \quad (2.4)$$

Тогда при воздействии стимулирующего сигнала, в виде белого шума, автокорреляционная функция которого представляет собой дельта функцию, взаимная корреляционная функция между входным и выходным сигналом будет равна отклику системы

$$R(t) = h(t) \quad (2.5)$$

Выше приведенные выражения позволяют синтезировать схему, показанную на рис.2.4. Заметим, что если на вход подать еще какой-либо сигнал, то его корреляционная функция с выходным сигналом будет равна нулю, так он не подается на коррелятор.

Преимуществом данного метода диагностики состоит в том, что он позволяет получить ответную реакцию объекта диагностирования во время его нормальной работы.

2.3. Диагностируемость радиоэлектронной аппаратуры

Под диагностируемостью радиоэлектронного оборудования следует понимать приспособленность исследуемого объекта к проведению его диагностики. Надо отметить, что, так как диагностика является составной частью технического обслуживания, то многие параметры РЭО как объекта технической эксплуатации (параметры надежности, ремонтно-пригодности и т.д.) относятся и к РЭО как к объекту технического диагностирования [24].

Обеспечение возможности проведения диагностики радиоэлектронного оборудования должно обеспечиваться еще на стадии его проектирования и производства [34]. Если проектировщиками и изготовителями радиооборудования предусмотрено проведение эффективной диагностики то, как правило, осуществить ее намного легче [33].

Например, в руководстве по техническому обслуживанию радиостанции «Баклан» указывается зависимость напряжения формируемого матрицей электронной перестройки (она используется для электронной перестройки входных цепей приемника радиостанции) от частоты установленной на пульте дистанционного управления радиостанцией. В самой же радиостанции предусмотрены специальные контрольные разъемы, параметры сигнала в которых описаны в технической документации, с указанием допусков на них.

В общем случае приспособленность радиоэлектронной аппаратуры к диагностированию определяется множеством самых различных характеристик. Из них особо можно отметить совокупность диагностических параметров для проверки работоспособности

$$\vec{U}_n = U\{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\},$$

которая является одной из важнейших характеристик приспособленности радиоэлектронной аппаратуры к диагностированию.

Другим основным показателем диагностируемости является коэффициент полноты проверок, который определяется по следующей формуле

$$K_n^k = \lambda_k / \lambda_n \quad (2.6)$$

где λ_k – суммарная интенсивность отказов контролируемых составных частей изделия; λ_n – суммарная интенсивность отказа всех составных частей изделия.

При неизвестных интенсивностях отказа этот параметр приближенно определяют исходя из количества контролируемых параметров с помощью выражения

$$K_n^k = m_k / m_n \quad (2.7)$$

где m_k – общее число используемых диагностических параметров; m_n – число диагностических параметров обеспечивающих требуемую достоверность определения технического состояния заданного объекта.

2.4. Обобщенная структура диагностической системы

Рассмотрим в общем виде процесс получения и обработки диагностической информации. Обобщенная структурная схема системы технического диагностирования представлена на рис.2.5. Система включает в себя объект технической диагностики и средства технического диагностирования, решающие поставленные диагностические задачи.

При определении технического состояния следует также учитывать воздействие помех, которые могут быть аддитивными $N_a(t)$, или мультипликативными $N_m(t)$ ¹.

Объект диагностирования под воздействием стимулирующих и управляющих сигналов формирует ответную реакцию (отклик, ответный сигнал), в котором заключена информация о текущем техническом состоянии данного объекта

$$S_u(t) = W(I_\lambda, S_c, U_{y1}, N_m) + N_a, \quad (2.8)$$

здесь I_λ – информация о техническом состоянии; S_c – тестовый сигнал; U_{y1} – сигнал управления режимом работы объекта диагностирования; W – оператор, описывающий взаимодействие всех выше перечисленных параметров в данной системе.

Измерительное устройство с определенной погрешностью σ_u осуществляет преобразование реакции объекта диагностирования (2.8) в измерительную информацию

$$I_u(t) = V(S_u, U_{y2}, \sigma_u), \quad (2.9)$$

здесь U_{y2} – сигнал управления измерительным устройством.

Вычислительное устройство производит выделение необходимой информации о текущем техническом состоянии из полученной измерительной информации

$$I_\lambda(t_0) = V(I_u, U_{y3}) \quad (2.10)$$

При чем следует отметить, что операция (2.10) обычно проходит согласно алгоритму, задаваемому управляющим сигналом U_{y3} от устройства управления.



Рис.2.5. Обобщенная структура системы технического диагностирования.

¹ При дальнейшем изложении материала зависимость различных параметров от времени может и не указываться, но при этом подразумевается, что она имеет место всегда.

В вычислительном устройстве также осуществляется определение текущего технического состояния объекта диагностирования сравнением полученной информации с информацией заложенной в генетическом информационном поле (например, это может быть база данных, в которую заложены номинальные значения параметров и допуски на них).

Данное действие можно описать следующим выражением

$$I_S(t_0) = L_S(I_\lambda / I_{\lambda 0}), \quad (2.11)$$

где t_0 – текущий момент времени.

Результатом его выполнения будет информация о техническом состоянии объекта. Одновременно текущие значения параметров должны заноситься в генетическое поле для дальнейшего их использования в целях прогнозирования технического состояния.

Прогнозирование технического состояния осуществляется устройством прогнозирования, которое осуществляет анализ данных о текущем состоянии объекта технического диагностирования и сравнивает полученные результаты с информацией заложенной в генетическое поле. Данный процесс можно записать в следующем виде

$$I_S(t_0 + T_{np}) = L_S \left\{ \frac{D[I_\lambda(t_0), T_{np}]}{I_{\lambda 0}} \right\} \quad (2.12)$$

где D – оператор осуществляющий вычисление технического состояния в момент времени $(t_0 + T_{np})$ по данным полученным в настоящий момент времени.

Информация, полученная в результате выполнения операций определения и прогнозирования технического состояния, выдается на устройство отображения диагностической информации (как правило, в удобной для восприятия оператором форме).

Соотношения ((2.8)-(2.12)) представленные выше позволяют представить процесс технического диагностирования в самом общем виде. Для построения и анализа систем технического диагностирования необходимо иметь некоторое формальное описание, как самого объекта диагностирования, так и процессов, протекающих в нем.

Эта задача решается путем применения диагностических моделей объекта диагностирования (или всей системы технического диагностирования). При этом под моделью следует понимать качественное и количественное представление процессов, отражающих влияние факторов, важных для рассмотрения. Диагностические модели должны отражать все процессы в диагностируемом объекте, характеризующие его техническое состояние.

Классификация, а также некоторые вопросы построения диагностических моделей изложены в следующем разделе диссертационной работы.

2.5. Диагностические модели радиоэлектронной аппаратуры

В настоящий момент теоретические методы выбора и построения диагностических моделей развиты достаточно глубоко [24], но и в этой области существует обширное поле для проведения как теоретических, так и практических исследований.

Выделяют следующие основные виды моделей объектов технической диагностики:

- аналитические модели (заданные в виде формулы) [14];
- модели на основе графов (или направленных или ненаправленных);
- функциональные модели (отражающие связь параметров между собой);
- логические модели (они отражают связь отдельных блоков системы);
- функционально-логические модели;
- информационные модели.

Существует также и множество других моделей [41, 31] однако вследствие ограниченности объема диссертационной работы остановимся на перечисленных типах, а об остальных видах моделей можно узнать из литературы по соответствующей тематике.

Наиболее часто используют функционально-логические модели объектов [33, 25].

Как правило, при построении функционально-логической модели объекта диагностирования необходимо иметь совокупность априорных данных, таких как:

- структурную схему объекта диагностирования;
- принципиальную электрическую схему объекта диагностирования;
- знать или иметь описание процессов протекающих в схеме;
- заданную глубину диагностики.

Глубину диагностирования обычно оценивают следующим образом

$$K_D = F/N \quad (2.13)$$

где F – число элементов системы на принятом уровне деления подвергаемых диагностике; N – общее число элементов различимых на принятом уровне деления.

Надо отметить, что такое представление этого параметра (2.13) далеко не всегда дает исчерпывающую картину о рассматриваемой диагностической системе.

Степень информативности диагностической системы будет различаться в зависимости от уровня деления. Радиоэлектронную систему принято делить на составные части следующим образом: приборы, блоки, узлы или субблоки, каскады, отдельные элементы.

Чем сложнее диагностическая система и выше требования к оперативности ремонта, тем выше уровень деления. Как правило, глубина диагностирования сложной радиоэлектронной системы не опускается ниже уровня блоков (или субблоков). Выявление отказавших элементов в самом блоке (субблоке) производится отдельно при их ремонте.

Если объект диагностирования условно разделен на n элементов, то передаточная функция системы может быть представлена в виде комплексной функции

$$K(p) = K\{K_1(p), K_2(p), \dots, K_n(p)\} \quad (2.14)$$

где $K_i(p)$ – коэффициент передачи отдельного элемента.

Матрица состояний объекта диагностирования может быть представлена в виде

$$D = \begin{pmatrix} y_{11}(p) & y_{21}(p) & y_{31}(p) & \dots & y_{n1}(p) \\ y_{12}(p) & y_{22}(p) & y_{32}(p) & \dots & y_{n2}(p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{1(i-1)}(p) & y_{3(i-1)}(p) & y_{3(i-1)}(p) & \dots & y_{n(i-1)}(p) \\ y_{1i}(p) & y_{2i}(p) & y_{3i}(p) & \dots & y_{ni}(p) \end{pmatrix}$$

здесь y_{ni} – отклик n -го элемента на i -е воздействие

Матрица состояний показывает поведение каждого элемента системы при различных воздействиях на нее. Она учитывает также тот факт, что при различных воздействиях на схему отклики отдельных ее элементов могут отличаться – при одном и том же входном сигнале на выходе одного элемента выходной сигнал может находиться в заданных пределах, а на выходе другого он может быть за пределами допусков. Воздействие входного сигнала системы S_i приведет к появлению откликов $y_{1i}(p), y_{2i}(p), \dots, y_{ni}(p)$ на выходах элементов диагностической модели. Входные сигналы $x_{1i}(p), x_{2i}(p), \dots, x_{ni}(p)$ некоторых элементов могут быть выходными сигналами элементов, которые в схеме расположены перед ними. Каждый элемент функциональной модели характеризуется дискретным состоянием «1» если элемент исправен, и «0» если в нем возник отказ.

Диагностические модели можно построить самыми различными способами. Например, диагностическая модель может быть построена на основе функциональной схемы диагностируемой системы, но будет несколько отличаться от нее, так как в диагностической модели могут присутствовать не все элементы функциональной схемы системы, а лишь те из них, которые подвергаются диагностированию. Например, на рис.2.6 показана упрощенная типовая функциональная схема приемного тракта связной радиостанции.

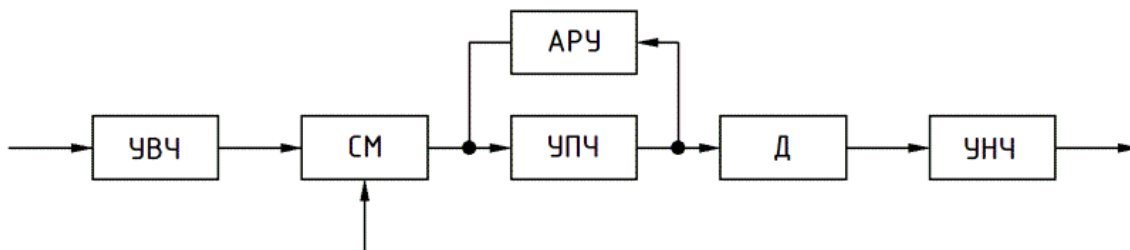


Рис.2.6. Функциональная схема радиоприемника.

УВЧ – усилитель высокой частоты; СМ – смеситель; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; АРУ – автоматическая регулировка усиления; Д – детектор; УНЧ – усилитель низкой частоты.

На основе данной функциональной схемы можно построить математическую модель приемника, выбор которой зависит от очень многих факторов. Критерием выбора модели может служить ее предназначение. Например, математическую модель представленную на рис.2.7. можно использовать для определения минимальной совокупности диагностических параметров необходимых для определения технического состояния системы. Причем заметим, что в данном случае диагностическая модель совпадает с функциональной схемой устройства, но в общем случае она может существенно от нее отличаться.

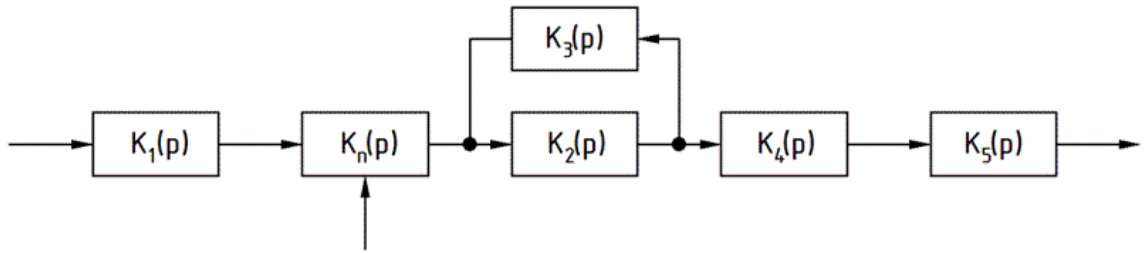


Рис.2.7. Функциональная диагностическая модель.

Модель, показанную на рис.2.7 можно представить также и в виде графа (рис.2.8). Представление системы графами (обычно направленными) в некоторых случаях очень удобно, однако не следует использовать постоянно только их, отвергая другие модели.

Описание системы на основе теории графов встречается очень часто [13]. Ориентированный граф системы обозначается $G(S, K)$, где $S(s_1, s_2, \dots, s_n)$ и $K(k_1, k_2, \dots, k_n)$ множество вершин и множество ребер соответственно. Вершины графа это сигналы в узлах схемы, т.е. фактически вершины представляют собой совокупность диагностических параметров. Осуществляя минимизацию графа путем эквивалентных преобразований [13] можно получить минимальное число диагностических параметров [24].

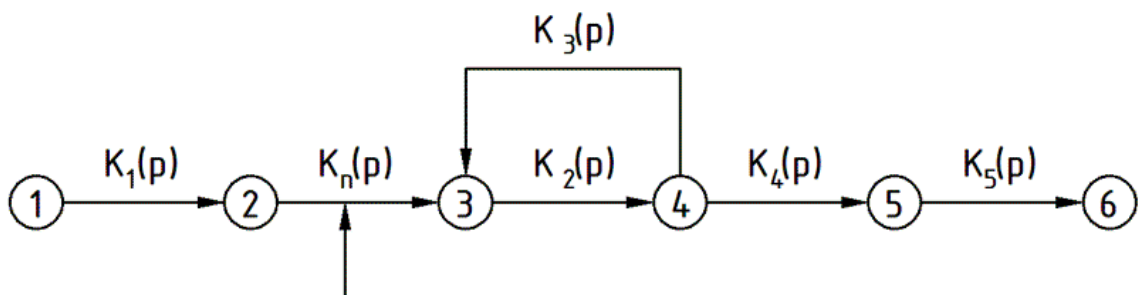


Рис.2.8. Граф, построенный на основе функциональной модели.

Матрица смежности, построенная для графа G , имеющего n вершин, представляет собой квадратную матрицу, которая записывается следующим образом

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

Элементы этой матрицы $a_{ij} = 1$, если вершины смежные (соединяются между собой), и $a_{ij} = 0$ в случае если вершины несмежные друг с другом. Элементы матрицы с индексами $i = j$ равны 1, так как каждая вершина является смежной сама с собой.

Для построения алгоритмов диагностирования можно также использовать модель, основанную на данных о вероятностях отказа элементов входящих в систему.

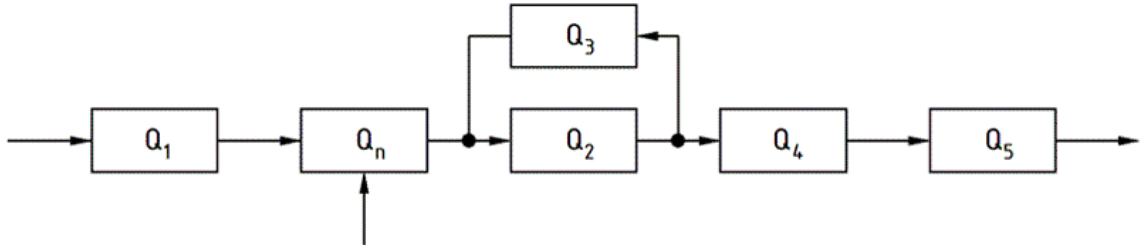


Рис.2.9. Математическая модель на основе данных об отказах блоков.

Знание вероятностей отказов блока и (или) элементов входящих в него позволяет более эффективно решать такие задачи диагностики как определение места отказа, определение причин отказа, прогнозирование отказов устройства и другие задачи (рис.2.9).

Заметим, что функциональная диагностическая модель радиоприемного тракта связной радиостанции можно иметь разную степень детализации в зависимости от заданной глубины диагностирования. Рассмотрим, например, упрощенную функционально-логическую модель приемника радиостанции «Баклан», показанную на рис.2.10.

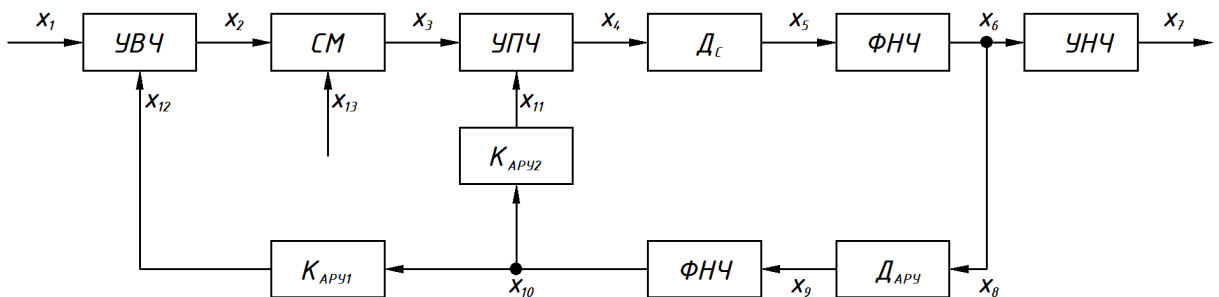


Рис.2.10. Функциональная диагностическая модель приемника радиостанции «Баклан».

Каждый блок представленной модели характеризуется рядом параметров. Для уточнения этих параметров может потребоваться детальное рассмотрение каждого блока. Возьмем для примера тракт усиления низкой частоты, без предварительного усилителя.

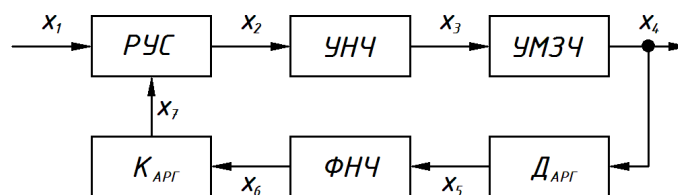


Рис.2.11. Низкочастотный тракт.

На рис.2.10 весь тракт усиления низкой частоты обозначен через УНЧ, а его развернутая схема, представленная на рис.2.11, включает в себя уже несколько блоков.

2.6. Выбор совокупности диагностируемых параметров

Под диагностическим параметром следует понимать некоторую физическую величину (например, ток, напряжение, частота, температура или даже сигнал), в которой заложена информация о техническом состоянии диагностируемого объекта. При этом различают параметры, поддающиеся непосредственным измерениям и параметры, определяемые путем проведения косвенных измерений. Также можно выделить простые параметры, которые характеризуются только одной физической величиной (например, величиной напряжения) и сложные параметры, которые определяются несколькими физическими величинами одновременно (например, амплитудно-модулированный сигнал определяется не только амплитудой, но и частотами несущей и огибающей, а также глубиной модуляции).

Выбор совокупности диагностируемых параметров представляет собой одну из важнейших задач [24], так как излишне большое количество параметров сильно увеличивает время проведения технического диагностирования вследствие того, что для их анализа потребуется больше вычислительных операций, а чрезмерно малое их количество приводит к снижению достоверности полученных результатов диагностирования.

И в том и в другом случае снижается эффективность работы системы технической диагностики, поэтому для определения необходимой совокупности диагностических параметров стараются разработать специальные алгоритмы выбора минимальной совокупности диагностических параметров, которые уменьшают общее число контролируемых параметров с наименьшим ущербом для показателей качества диагностирования.

Следует также отметить, что выбор оптимальной совокупности параметров является довольно сложной задачей, при решении которой следует учитывать многие факторы [33], например, не всегда параметры, принадлежащие к минимальной совокупности, можно легко измерить и возникает необходимость проведения ряда косвенных измерений.

При этом следует говорить о выборе совокупности диагностических параметров для каждой из решаемых системой технического диагностирования задач [25]. То есть о выборе совокупности диагностических параметров для определения технического состояния, поиска места отказа или для проведения прогнозирования технического состояния.

Наиболее часто при построении алгоритмов выбора совокупности диагностируемых параметров применяют графо-аналитические модели. Данные методы довольно хорошо освещаются в имеющейся литературе по техническому диагностированию радиоэлектронного оборудования, и вследствие этого нет смысла подробно их рассматривать. Отметим только, что выбор совокупности диагностических параметров проводится путем минимизации графа полученного на основе анализа функциональной (или функциональ-

но-логической) модели диагностируемого объекта. Задача минимизации графа сводится к определению внешнего устойчивого множества, и решается методами теории графов (путем эквивалентных преобразований графа). Для минимизации совокупности диагностируемых параметров используют также различные варианты информационного метода, описание которых довольно часто встречается в литературе по технической диагностике.

В настоящей работе для оптимизации выбора совокупности диагностических параметров предлагается использовать метод, основанный на использовании сигнальных графов, но несколько отличающийся от существующих. Рассмотрим метод на конкретном примере, в качестве которого возьмем радиоприемный тракт радиостанции «Баклан».

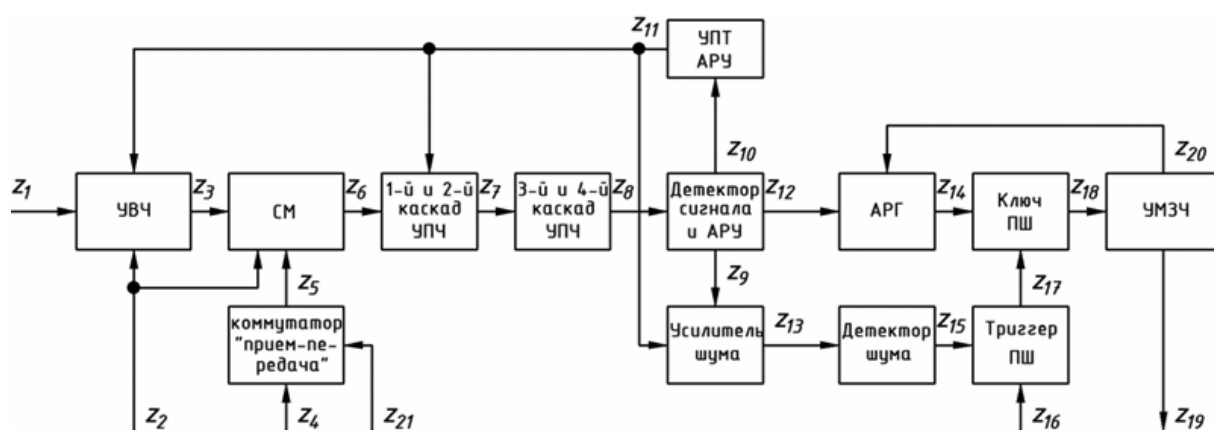


Рис.2.12. Функционально-логическая модель диагностирования.

Упрощенная функционально-логическая модель приемника показана на рис.2.12. Входные и выходные сигналы отдельных блоков приемника образуют совокупность диагностических параметров z_k . На основании представленной функционально-логической модели построим граф взаимосвязей диагностических параметров (иначе говоря, сигнальный граф) заданного объекта. Сигнальный граф будет таким, как показано на рис.2.13.

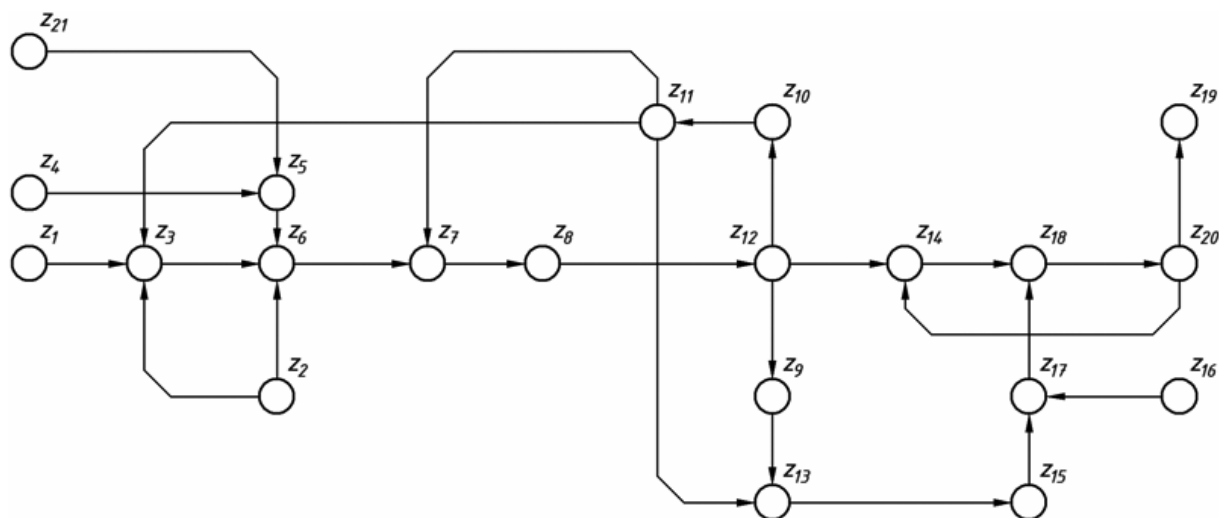


Рис.2.13. Граф взаимосвязей сигналов построенный по функционально-логической модели

Построим матрицу отображений D для данного графа. Матрица отображений строится по следующему принципу: элемент матрицы $a_{ij} = 1$, если i -я вершина графа отобра-

жается в j -ю вершину (дуга направлена от i -й вершины к j -й), в противном случае $a_{ij} = 0$.

При этом считается, что каждая вершина отображается также сама в себя. Матрица отображений очень сильно напоминает матрицу смежности [13], которую строят для ненаправленных графов, только в данном случае учитывается еще и направление дуг.

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix}
 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{pmatrix}$$

Матрицу можно также записать и в виде вектора (что более компактно), элементы которого будут отображать двоичный код определенного столбца матрицы отображений.

Обратим внимание на тот факт, что строки данной матрицы указывают на какое количество сигналов влияет данный сигнал, а столбцы матрицы показывают, сколько сигналов влияют на него. Суммы элементов строк и столбцов представляют собой некоторые весовые коэффициенты, определяющие важность контроля данного сигнала.

Обозначим коэффициент влияния отдельного диагностического параметра (в данном случае сигнала) на остальные через C_1^n , а коэффициент влияния остальных сигналов на данный (взаимосвязь сигнала с остальными) обозначим как C_2^n , где n – номер сигнала.

Для выбора основных параметров из всей совокупности можно задаваться различными весовыми функциями. И как уже отмечалось выше, для решения каждой задачи диагностики совокупность параметров может отличаться, причем иногда очень сильно.

Например, рассмотрим выбор диагностических параметров для определения технического состояния. При этом очевидно, что чем больше оба коэффициента, тем большую значимость приобретает параметр, то есть в данном случае за функцию предпочтения можно принять среднее геометрическое значение коэффициентов

$$W_n = \sqrt{C_1^n \cdot C_2^n} \quad (2.15)$$

На рис.2.14. приведен график распределения функции предпочтения (2.15).

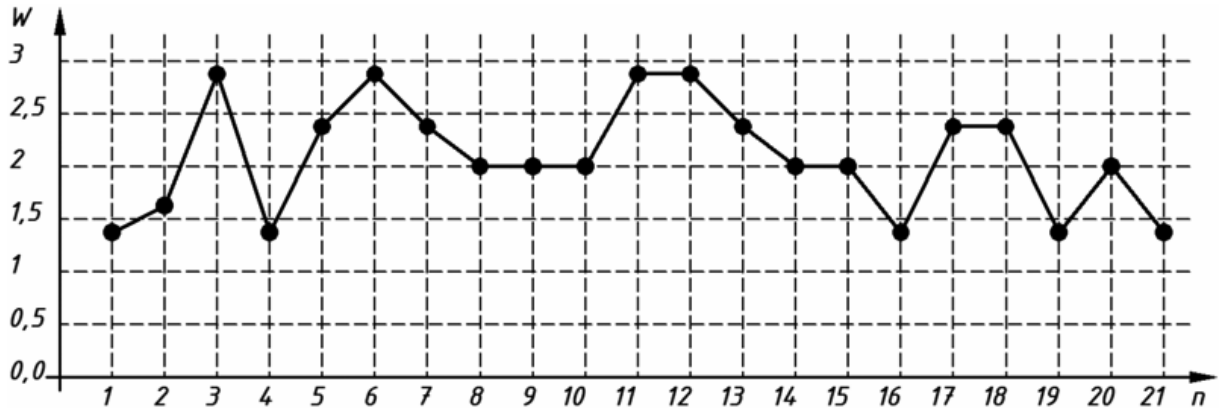


Рис.2.14. График распределения функции предпочтения.

С другой стороны актуально контролировать тот параметр, который не только влияет на остальные, но и сам зависит от них, так как в этом случае в нем может быть заложена информация о состоянии сразу нескольких блоков. Иными словами такой параметр более информативен. В этом случае функцию предпочтения можно задать в виде

$$W_n = |C_1^n - C_2^n| \quad (2.16)$$

График распределения функции предпочтения (2.16) показан на рис.2.15.

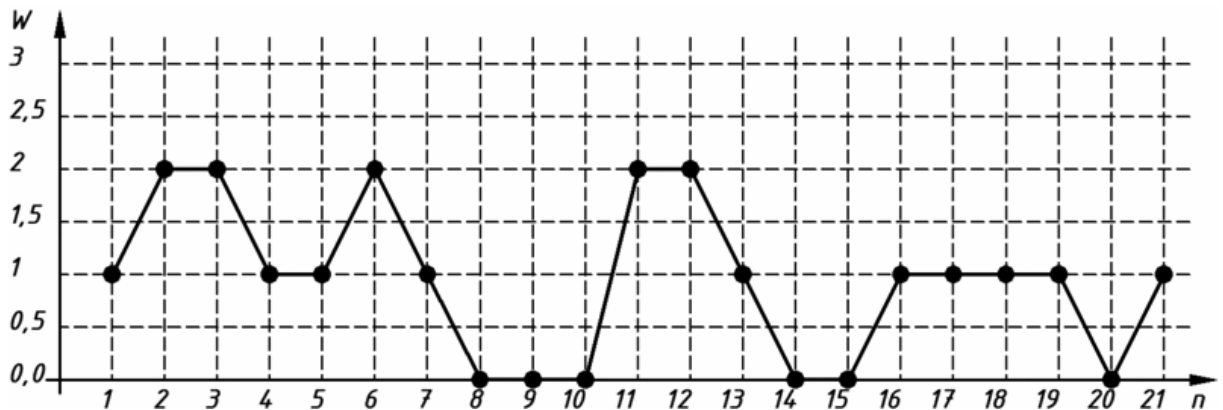


Рис.2.15. График распределения функции предпочтения.

Полученные ранее критерии (2.15) и (2.16) можно легко объединить в один

$$W_n = \frac{|C_1^n - C_2^n|}{\sqrt{C_1^n \cdot C_2^n}} \quad (2.17)$$

Параметры, для которых функция предпочтения (2.17) имеет максимальное значение подвергать диагностированию наиболее актуально. Распределение функции предпочтения (2.17) для заданного сигнального графа имеет вид, показанный на рис.2.16.

Проверяя блоки в порядке уменьшения определяющего параметра, получим наиболее рациональный алгоритм проведения диагностики (например, поиска места отказа). А в случае отбрасывания параметров, не играющих существенной роли, получим алгоритм выбора совокупности параметров для проведения контроля работоспособности объекта.

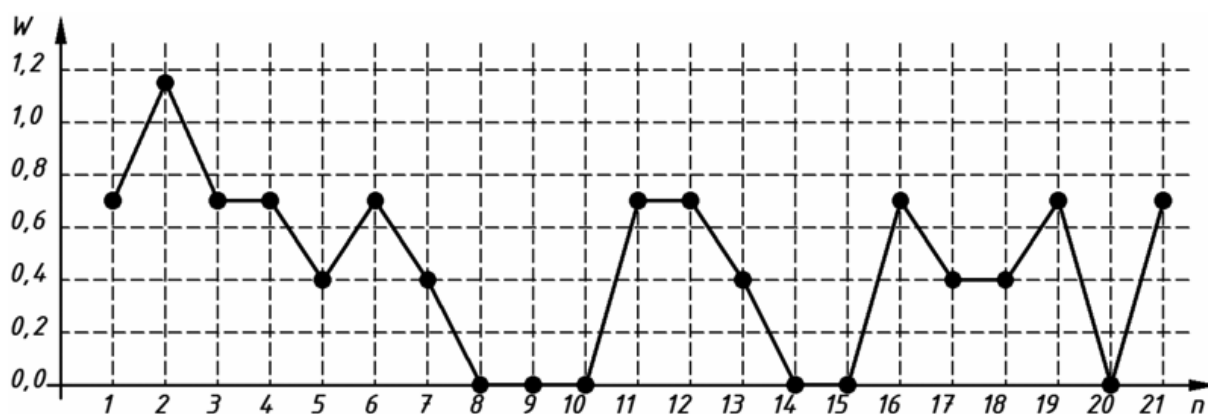


Рис.2.16. График распределения функции предпочтения.

Алгоритмы выбора совокупности диагностируемых параметров в общем случае весьма схожи с алгоритмами поиска отказа, рассматриваемыми в соответствующем разделе данной диссертационной работы. Выбор конкретного алгоритма зависит от многих факторов (для чего проводится диагностирование, какие аппаратные средства диагностики имеются в наличии, глубина диагностирования и многих других).

Однако построение алгоритма выбора минимальной совокупности параметров для выполнения тех или иных диагностических задач является только одной из составных операций при проведении анализа объекта диагностирования. Помимо создания самого алгоритма выбора минимальной совокупности диагностируемых параметров, особое значение имеет проблема определения допусков на диагностические параметры [24].

От того, как определены величины допусков на выбранные диагностические параметры, во многом зависит точность и достоверность диагностирования. При этом следует также учитывать целевое назначение параметров, для которых эти допуски определяются.

Выбор допусков диагностических параметров является многогранной задачей [25], охватить все аспекты которой не представляется возможным. Вследствие этого в следующем разделе настоящей диссертации кратко рассматриваются лишь некоторые вопросы выбора допусков на параметры, решение которых могло бы способствовать повышению точности и достоверности проведения операций технического диагностирования.

2.6.1. Выбор допусков на диагностические параметры

Как уже было отмечено выше, выбор допусков является довольно сложной задачей, при решении которой следует учитывать очень многие факторы [25]. Например, при выборе допусков следует не только определить допустимые входные и выходные значения для отдельных блоков, но и учитывать взаимосвязь между отдельными блоками системы.

Так как отдельные блоки связаны между собой, то выходной сигнал одного блока системы может одновременно являться входным сигналом другого блока.

В этом случае при допустимых значениях параметров выходного сигнала для одного блока они могут оказаться недопустимыми для входного сигнала последующего блока. Это графически поясняется на рис.2.17, на котором показывается случай, когда сигнал оценивается всего двумя параметрами – амплитудой и частотой.

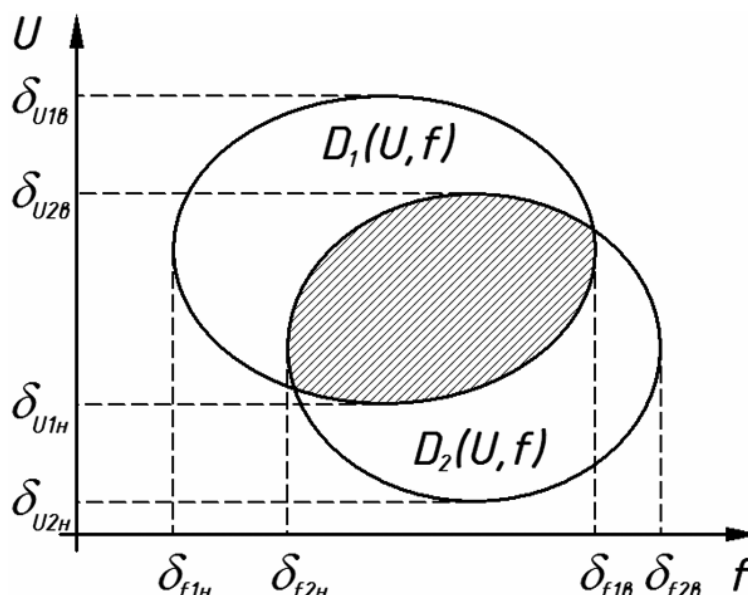


Рис.2.17. Определение допуска диагностических параметров.

При выборе допусков на диагностические параметры следует учитывать также и то, для чего они будут использоваться. Если для определения работоспособного состояния, то допуски следует устанавливать так, чтобы они соответствовали нормальной работе и одного и второго блока, то есть в данном случае это есть пересечение допусков на параметры выходного сигнала первого блока и входного сигнала второго (см. рис.2.17)

$$\delta_{раб} = \delta_{(n-1).вых} \cap \delta_{n.вх} \quad (2.18)$$

Для поиска места отказа может потребоваться знание допусков отдельно для выходного сигнала n -го блока системы и входного сигнала $(n-1)$ -го блока. Это необходимо, прежде всего, для уточнения – является ли отказ проверяемого блока следствием отказа предыдущего блока системы (зависимый отказ) или же имеет независимый характер.

2.7. Поиск места отказа в радиоэлектронной аппаратуре

Поиск места отказа является одной из основных задач технического диагностирования, после определения текущего технического состояния. На практике поиск места отказа часто осуществляется параллельно с процессом определения технического состояния радиоэлектронного оборудования, и не всегда эти два процесса можно отделить один от другого. Поэтому как следствие проявляется и схожесть алгоритмов выбора совокупности параметров для определения состояния радиоаппаратуры и для поиска места отказа.

Поиск отказавшего элемента системы является довольно сложной и многоальтернативной задачей. Алгоритмы поиска отказа могут быть жесткими или гибкими [24].

При жестких алгоритмах текущее техническое состояние радиоэлектронного оборудования не учитывается, то есть последовательность контроля параметров радиоэлектронной системы идет по заранее заложенной программе, которая во всех случаях одна и та же. Гибкие алгоритмы учитывают текущее техническое состояние радиоэлектронной аппаратуры и перестраиваются для улучшения эффективности поиска отказа.

В гибких алгоритмах перспективно использование информации полученной в результате прогнозирования технического состояния радиоэлектронной системы.

Например, если в результате прогнозирования технического состояния получена информация о возможном в ближайшее время выходе одного из параметров объекта диагностирования за пределы установленных допусков, то при отказе системы именно с контроля этого параметра и должен начинаться процесс поиска отказавшего блока системы.

При создании алгоритмов диагностирования очень часто используются статистические данные по отказам отдельных блоков радиоэлектронного оборудования [33].

Так как статистические данные можно считать достоверными только с определенной степенью вероятности то большее внимание стоит сосредоточить на методах, не использующих данных об отказах отдельных блоков системы. Достоверность имеющихся статистических данных тем выше, чем больше происходит отказов элементов, а одной из задач системы технической диагностики как раз является предотвращение возникновения отказов в радиоэлектронном оборудовании. Кроме того, современные элементы авиационной радиоэлектронной аппаратуры имеют очень высокие показатели надежности.

Вероятностные методы поиска могут повысить эффективность проведения поиска отказа, а могут и не дать желаемого результата, в то время как методы, не учитывающие вероятности отказов элементов, в любом случае будут повышать эффективность поиска.

Определенный интерес представляют комбинированные методы поиска, объединяющие несколько методов, так как они сочетают в себе достоинства и тех и других.

2.7.1. Классификация методов поиска отказа

В настоящее время существует множество алгоритмов проведения поиска места возникновения отказа [20]. Имеющиеся на сегодняшний день алгоритмы поиска места отказа основаны на различных принципах, позволяющих снизить время поиска, количество необходимых измерений, трудоемкость их проведения или реализовать все ранее перечисленные принципы. Из существующих в настоящее время методов поиска отказа можно выделить несколько основных групп алгоритмов:

- алгоритмы поиска неисправности, учитывающие вероятности отказов элементов;
- алгоритмы, основанные на учете взаимосвязей между элементами системы;
- алгоритмы, уменьшающие трудоемкость поиска неисправности;
- различные комбинированные алгоритмы.

Из методов учитывающих статистические данные по отказам наиболее широко используются информационный метод и метод «время-вероятность» (иногда его называют методом «время-безотказность»). Последний метод редко используют в чистом виде.

Информационный подход к поиску места [24, 25] отказа подразумевает проведение необходимых проверок таким образом, чтобы первыми проводились проверки несущие наибольшую информацию об отказе, а последующие в порядке уменьшения их информативности. При этом неопределенность с каждым последующим шагом уменьшается.

Метод «время-вероятность» заключается в проведении проверок элементов системы в порядке уменьшения вероятности их безотказной работы. Однако, как уже отмечалось, данный метод в той формулировке, которая приводится выше, применяют довольно редко. Существует комбинированный алгоритм, который наряду с данными по отказам элементов использует сведения о трудоемкости необходимых измерений. Данный алгоритм предполагает проведение проверок так, чтобы выполнялось условие

$$\sum_{n=1}^N T_{изм n} \cdot P_n \rightarrow \min \quad (2.19)$$

В выражении (2.19) $T_{изм}$ – время проведения измерений, необходимых для определения состояния блока, а P – вероятность безотказной работы данного блока.

При большой трудоемкости измерений и количестве проверяемых элементов подобный алгоритм существенно экономит затраты времени для проведения поиска отказа.

Необходимость наличия статистических данных накладывает некоторое ограничение на вероятностные методы поиска места отказа, поэтому при отсутствии подобных данных используются иные алгоритмы, из которых наиболее известен метод половинного разбиения [45, 46] (иначе его называют методом средней точки [24] или дихотомическим

методом [26]). Наиболее часто этот метод используют, если система имеет последовательную структуру (рис.2.18), но возможно его применение и в ряде других случаев.

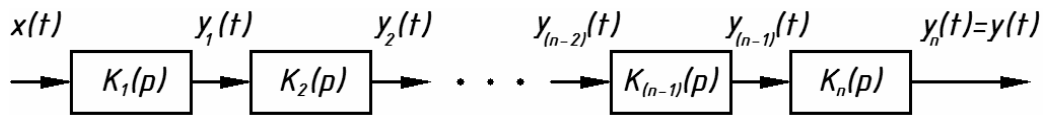


Рис.2.18. Система последовательного типа

В системах последовательного типа передаточная функция системы (2.14) от входа к любой точке определяется произведением передаточных функций отдельных блоков [9]. При выходе из строя одного блока системы та часть системы, которая расположена после этого блока, также окажется неработоспособной, и как следствие вся система в целом.

Для определения неисправности в системах такого типа есть несколько методов, в простейшем случае это метод последовательных измерений. Метод последовательных измерений состоит в том, что для выявления отказавшего элемента проверяют соответствие выходного сигнала каждого звена некоторому заданному эталону, то есть проверяется нахождение сигнала на выходе каждого блока в пределах установленных допусков.

При применении данного метода может потребовать проведения $n-1$ измерений.

Вследствие неэффективности данного способа определения места отказа при диагностике радиоэлектронных систем применяются методы групповых измерений [33].

При методах групповых измерений проводят измерение не каждого элемента последовательно, а проверяют соответствие эталону выходного сигнала части системы.

Из этой группы методов наибольшую известность, как уже отмечалось, имеет метод половинного разбиения, который также известен как метод средней точки или метод дихотомии. Поиск отказавшего блока в системе из n элементов методом половинного разбиения заключается в том, что сначала проверяется состояние на выходе блока с номером $n/2$. Если сигнал на выходе данного блока системы не находится в пределах заданных допусков, то проверяется блок с номером $n/4$ и т.д., то есть отказавший участок системы (или цепи) постоянно делят пополам вплоть до выявления отказавшего блока системы.

Вычислим количество измерений для метода половинного разбиения (метода дихотомии). Для этого выясним, сколько непроверенных элементов остается после каждого измерения. После первого измерения останется половина от общего количества элементов, то есть $N_1 = n/2 = n/2^1$, после второго $N_2 = n/2 = n/2^2$, после третьего $N_3 = n/2^3$, и так далее до значения после m -й проверки $N_m = n/2^m$.

Очевидно, что в итоге должен остаться всего один элемент

$$N_m = n/2^m = 1 \Rightarrow 2^m = n \Rightarrow m = \log_2 n \quad (2.20)$$

Таким образом, количество измерений необходимых для выявления отказавшего элемента методом дихотомии (2.20) составит $\log_2 n$. При последовательных проверках каждого блока могло понадобиться до $n-1$ измерений, что значительно больше.

Рассмотрим применение этого метода на конкретном примере. Пусть задана цепь, состоящая из шестнадцати последовательно соединенных одинаковых резисторов (см. рис.2.19). Один из резисторов имеет внутренний дефект, который не выявил внешний осмотр, требуется определить неисправный элемент цепи и устранить неисправность.

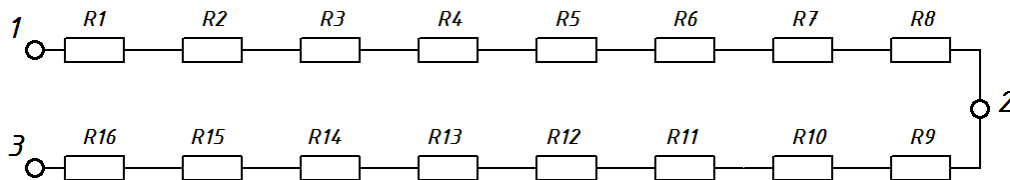


Рис.2.19. Поиск неисправности методом половинного разбиения.

Разобьем цепь пополам и измерим один из полученных участков цепи. Если измеряемый участок цепи исправен то другой неисправный. Разбиваем второй участок цепи пополам, проводим измерение и т.д. В результате для выявления неисправного элемента цепи понадобится всего четыре измерения, в то время как при выявлении отказа методом последовательных измерений количество измерений могло достигнуть шестнадцати.

В некоторых литературных источниках метод половинного разбиения трактуют иначе [33]. Его рассматривают как частный случай информационного метода.

При этом исходят из предположения, что все элементы последовательной системы имеют одинаковую вероятность отказа. Первым необходимо контролировать параметр z_i , несущий максимум информации о текущем техническом состоянии диагностируемой системы, при этом неопределенность состояния оценивается величиной энтропии

$$H_0 = -\sum_{n=1}^N P(S_n) \log P(S_n) = \log_2 N \quad (2.21)$$

Исходя из этого, целесообразно первым необходимо контролировать параметр, который разбивает объект диагностирования пополам, то есть так чтобы $H(z_i) = H_0/2$.

Не целесообразность такого подхода к данному методу очевидна, так как количество измерений методом половинного разбиения никак не зависит от вероятности отказа элементов системы и является в любом случае одним и тем же.

Данную трактовку метода половинного разбиения (2.21) можно использовать лишь в том случае, если он используется при поиске отказавшего элемента в системе, со структурой сильно отличающейся от последовательной, или следует назвать его как-то иначе.

В случае необходимости использования методов, использующих статистические данные, интенсивность отказов функциональных блоков (узлов) системы можно прибли-

зительно определить аналитическим способом, по известным средним интенсивностям отказов элементов входящих в данный узел. При этом, производя расчет, полагают, что все элементы, входящие в блок, соединены друг с другом последовательным способом.

Интенсивность отказа n -го узла системы определяют по формуле

$$\lambda_n = \sum_{i=1}^M \lambda_i^n \cdot m_i^n \quad (2.22)$$

Более точный расчет производится с использованием поправочных коэффициентов, учитывающих особенности эксплуатации рассматриваемой аппаратуры, тогда

$$\lambda_n = C_n \cdot \sum_{i=1}^M \lambda_i \cdot m_i \quad (2.23)$$

Суммарная интенсивность отказов всей аппаратуры определяется выражением

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{n=1}^N \lambda_n \quad (2.24)$$

Средняя наработка радиоэлектронного оборудования на отказ при этом составит

$$T_0 = 1/\lambda_{\Sigma} \quad (2.25)$$

Вероятность отказа n -го блока системы определяется по формуле

$$Q_n = \lambda_n/\lambda_{\Sigma} \quad (2.26)$$

Вычислив вероятности отказа всех блоков входящих в систему можно применить информационный метод поиска отказа или метод «время-безотказность».

В Табл.2.1. приведены типовые значения интенсивностей возникновения отказов для некоторых элементов радиоэлектронной аппаратуры.

Табл.2.1. Интенсивности отказа некоторых элементов радиоаппаратуры.

№	Наименование радиоэлемента	Среднее значение интенсивности отказов, [1/ч]
1	Интегральные микросхемы	
	1.1 Средней степени интеграции	$0,01 \cdot 10^{-6}$
2	Полупроводниковые диоды	
	2.1 Кремниевые	$3 \cdot 10^{-6}$
3	Резисторы	
	3.1 Резисторы непроволочные	$0,3 \cdot 10^{-6}$
4	Конденсаторы электролитические	
	4.1 С танталовым анодом	$2,2 \cdot 10^{-6}$
5	Переключатели	$1,5 \cdot 10^{-6}$

2.7.2. Применение методов оптимизации функций к поиску отказа

Алгоритм поиска отказа в многозвенной системе можно улучшить, если для этих целей использовать известные из вычислительной математики методы оптимизации функций [93, 95]. Из теории оптимизации функций известно, что стратегия поиска искомой точки будет оптимальна, если для построения последовательности итераций использовать числа ряда Фибоначчи ($F_{n+1}=F_n+F_{n-1}$, при этом считается $F_1=1$ и $F_0=1$) [94, 38].

Применение оптимального метода Фибоначчи к оптимизации поиска места отказа в многозвенной системе последовательного типа заключается в том, что система разбивается на звенья с количеством элементов входящих в них приблизительно в соотношении двух смежных чисел ряда Фибоначчи. При этом проверяется на работоспособность тот элемент системы, который соответствует точке разбиения.

Однако этот метод обладает тем недостатком, что пропорция разбиения интервала неопределенности зависит от номера проверки, так как при последующих проверках пропорция разбиения участка должна вычисляться заново постоянно. Этот недостаток создает некоторые трудности при его реализации, поэтому в место него лучше применить метод золотого сечения. В принципе можно сказать, что метод золотого сечения есть предельный случай метода Фибоначчи. Для отношения двух чисел ряда Фибоначчи установлен предел

$$q = \lim_{n \rightarrow \infty} (F_{n-1}/F_n) = 0,618034 \quad (2.27)$$

Разбиение интервала неопределенности (отказавшего участка цепи) в соотношении (2.27) называется методом золотого сечения [38]. При этом отношение большей части интервала неопределенности к меньшей равно отношению всего интервала к большей его части.

Оценим количество измерений необходимых при поиске места отказа методом золотого сечения [4], и заметим, что могут возникнуть две равновероятные ситуации:

- неисправный элемент всегда оказывается в большей части;
- неисправный элемент всегда оказывается в меньшей части.

В случае если неисправность постоянно оказывается в большей части то количество элементов оставшихся после первого измерения $N_1=q \cdot n$, после второго $N_2=q^2 \cdot n$ и т.д. После m -го измерения $N_m=q^m \cdot n$, то есть можно записать

$$N_m = q^m \cdot n = 1 \Rightarrow m_{\max} = \log_q(1/n) \approx 1,44 \cdot \log_2 n \quad (2.28)$$

Если же неисправный элемент оказывается в части с меньшим количеством элементов то, проводя аналогичные рассуждения, получим $N_m=(1-q)^m \cdot n$, тогда

$$N_m = (1-q)^m \cdot n = 1 \Rightarrow m_{\min} = \log_{1-q}(1/n) \approx 0,72 \cdot \log_2 n \quad (2.29)$$

Определим среднее количество измерений. Предположим, что отказ попеременно может оказываться в большей, или в меньшей ее части. То есть если после первого измерения $N_1=q \cdot n$, то после второго может быть $N_2=q \cdot (1-q) \cdot n$ и т.д. Вследствие того, что нахождение отказа на каждом участке равновероятно то очевидно, что в среднем будет $m/2$ сомножителей q и $m/2$ сомножителей $(1-q)$ и в результате будем иметь

$$N_m = [q(1-q)]^{\frac{m}{2}} \cdot n = 1 \Rightarrow m = 2 \cdot \log_{q(1-q)}(1/n) \approx 0,96 \cdot \log_2 n \quad (2.30)$$

В результате проведенного анализа видно, что среднее количество измерений методом золотого сечения на 4% меньше количества измерений при дихотомическом методе (2.20). На графике (рис.2.20) показано как процесс поиска места отказа методом золотого сечения сходится неисправному блоку для системы последовательного типа из 64 элементов и для сравнения приведен график сходимости при поиске методом дихотомии.

Из представленного графика видно, что среднее число проверок методом золотого сечения немного больше. Это получилось не из-за того, что приведенные выше рассуждения были неверны а, в результате того, что нельзя проверить 1,5-й блок (следует выбрать либо 1-й, либо 2-й блок). При этом следующее разбиение дает несколько большее количество непроверенных блоков, чем должно было быть, и появляется некоторое несоответствие.

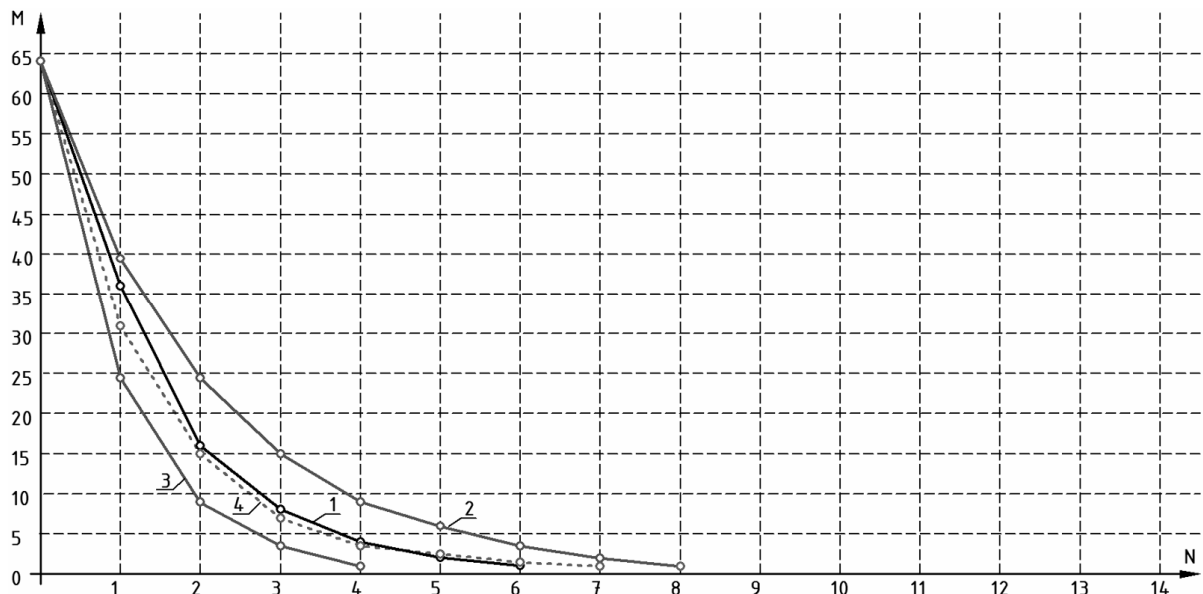


Рис.2.20. Сходимость к месту отказа при поиске методом золотого сечения

1 – методом дихотомии; 2 – худший случай; 3 – лучший случай; 4 – среднее значение

При увеличении интервала, например, разбивая участок в соотношении 0,75:0,25 (см. рис.2.21) сходимость вначале несколько возрастает, но затем резко падает, и среднее количество измерений получается значительно больше. При нахождении пропорции разбиения в интервале от 0,5 до 0,618034 скорость сходимости процесса будет оптимальной.

Этому можно дать следующее объяснение: наилучшими характеристиками обладает метод Фибоначчи, при котором интервал разбивается в соотношении двух смежных чи-

сел Фибоначчи. Величина отношения этих чисел может принимать значения от 0,5 (соотношение для первых двух чисел ряда Фибоначчи) до значения 0,618034 (золотое сечение), которое дают в пределе бесконечно большие смежные числа ряда Фибоначчи. Заметим что при разбиении в соотношении 0,5:0,5 получим метод половинного разбиения.

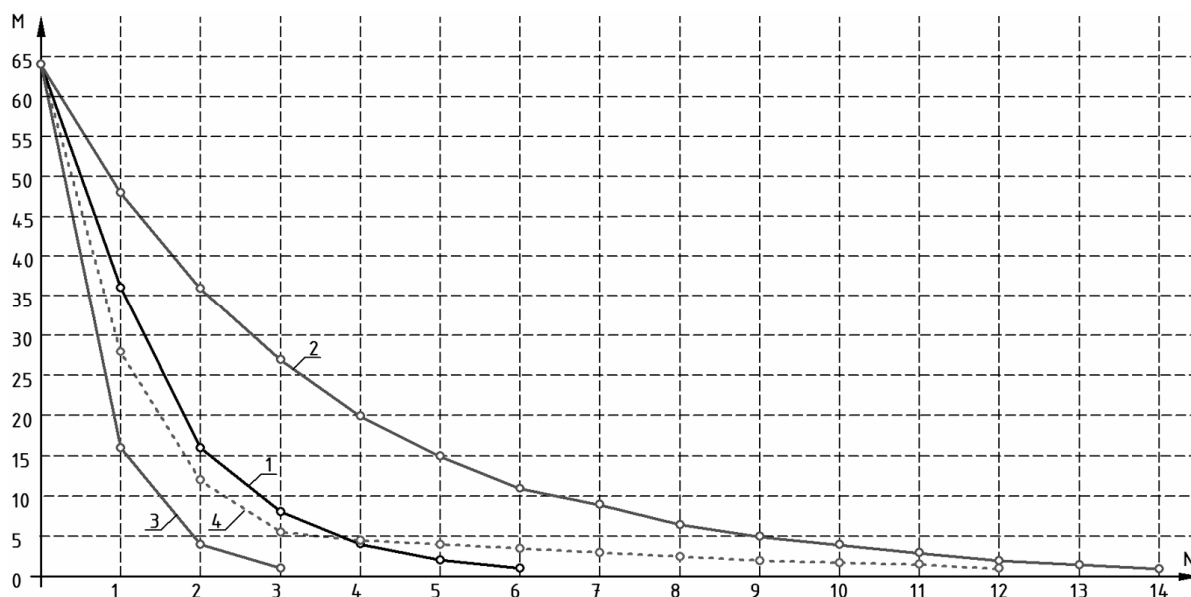


Рис.2.21. Сходимость к месту отказа при превышении пропорции разбиения

1 – методом дихотомии; 2 – худший случай; 3 – лучший случай; 4 – среднее значение

На основании результатов проведенных исследований можно сделать вывод о выборе оптимальном соотношении разбиения неисправной части системы для определения места отказа. Выше было показано, что при проведении поиска отказавшего элемента наиболее рационально разбивать исследуемый участок схемы в соотношении 0,5...0,618. Совершенно очевидно, что данный метод имеет перспективы для его использования в автоматических системах диагностики радиоэлектронных систем при большом количестве проверяемых блоков для оптимизации времени поиска отказавшего элемента системы.

В отличие от методов, использующих статистические данные об отказах элементах, метод золотого сечения, метод Фибоначчи, а также дихотомический метод в любом случае снижают общее количество измерений, что дает им ряд преимуществ. Алгоритм, построенный на изложенных выше принципах, помимо снижения среднего количества измерений (согласно выражению (2.30)), приобретает дополнительно гибкость и его можно комбинировать с другими методами (использующими статистическую информацию), что будет способствовать дальнейшему повышению эффективности данного метода.

Например, если использовать метод золотого сечения с учетом вероятности отказа элементов на каждом из участков, то он даст преимущество по сравнению с дихотомическим методом, так как в этом случае среднее число измерений сдвинется в сторону уменьшения, и будет приближаться к величине, определяемой соотношением (2.29).

2.8. Прогнозирование технического состояния

Посредством анализа выбранной совокупности диагностических параметров радиооборудования можно не только дать заключение о текущем техническом состоянии объекта технического диагностирования, но и предсказать с определенной вероятностью как долго это состояние может продлиться. То есть имеется возможность предсказать нахождение радиоаппаратуры в заданном состоянии (например, работоспособности или функционирования) в течение определенного временного интервала.

Эта задача решается методами прогнозирования технического состояния [24, 25].

Для современных систем технического диагностирования прогнозирование технического состояния объекта является одной из наиболее перспективных задач.

Прогнозирование технического состояния позволяет не только предсказать выход из строя радиоэлектронного оборудования, но и определить оптимальную периодичность проведения операций технического диагностирования, а также использовать результаты прогнозирования при создании гибких алгоритмов диагностирования.

Например, в разделе 2.6 данной диссертационной работы отмечалось возможность использования данных прогнозирования технического состояния при поиске места отказа. Аналогично, результаты прогнозирования могут быть использованы и при построении алгоритмов определения технического состояния радиоэлектронного оборудования.

Применение прогнозирования технического состояния позволяет значительно повысить эффективность системы технической диагностики, что в свою очередь приводит к повышению эффективности эксплуатации авиационного радиоэлектронного оборудования, и способствует обеспечению заданного уровня безопасности полетов.

Важность прогнозирования технического состояния объекта очевидна, так как оно позволяет предотвратить возникновение отказа оборудования до его возникновения.

Стоимость затрат, связанных с возникновением отказа во время полета, может во много раз превысить расходы по разработке и внедрению эффективной системы диагностики с возможностью прогнозирования технического состояния.

При проведении прогнозирования технического состояния используют не только данные, полученные в текущий момент времени и результаты предыдущих измерений.

Знание предыдущих результатов измерения указывает на необходимость применения запоминающих устройств в системах технического диагностирования.

При этом хранение в памяти информации о состоянии радиоэлектронного оборудования за весь период его эксплуатации не актуально по нескольким причинам.

Например, использование результатов измерений сделанных до проведения ремонта (или после проведения восстановления ресурса) совместно с результатами измерений сделанных после его проведения в целях прогнозирования может привести к неправильному прогнозу и как следствие снизится достоверность результатов диагностики.

Это обусловлено, прежде всего, тем, что неисправные ранее элементы могут быть заменены, что приведет к изменению закона изменения контролируемого параметра во времени (новые данные изменяются по одному закону, а предыдущие по другому).

Еще одной причиной, по которой хранить все данные в памяти не актуально является то, что излишне большое количество данных зачастую не требуется, а в некоторых случаях может даже оказывать негативное влияние на работу диагностической системы.

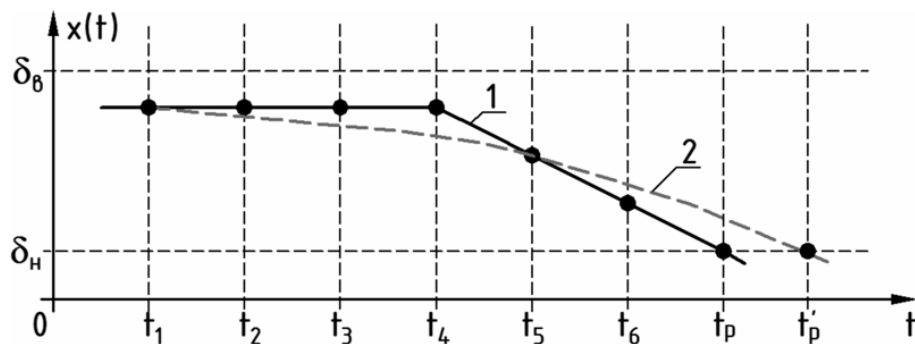


Рис.2.22. Изменение контролируемого параметра во времени

1 – действительный закон изменения контролируемого параметра во времени;

2 – закон изменения параметра, вычисленный устройством прогнозирования.

Рассмотрим, например, случай показанный на рис.2.22. На временном участке от t_1 до t_4 параметр $x(t)$, определяющий работоспособность системы, находится в стабильном состоянии, но в момент времени t_4 его величина начинает падать (причиной может быть, например неправильная работа одного из элементов схемы вызванная кратковременным скачком напряжения в бортовой сети). Выход данного параметра за пределы нижнего допуска при этом должен произойти в момент времени t_p , с наступлением которого диагностируемая система перейдет в неработоспособное состояние.

При аппроксимации всех экспериментально полученных данных одной функциональной зависимостью от времени (на рис.2.22 она показана штриховой линией) и проведения последующего анализа могут быть получены неверные результаты прогнозирования. Согласно полученным результатам выход определяющего параметра за пределы установленных допусков произойдет в момент времени t'_p , который находится дальше на временной оси, чем действительный момент выхода объекта диагностирования из состояния работоспособности. Погрешность прогнозирования в этом случае будет во многом определяться видом выбранной аппроксимирующей функциональной зависимости.

Между тем если разбить рассматриваемый интервал времени на два участка (первый от t_1 до t_4 , а второй от t_4 до t_6), и анализировать данные, которые получены после возникновения неисправности, то точность прогнозирования можно значительно повысить.

Таким образом, излишнее количество старых данных может негативно сказываться на эффективности работы системы, поэтому данные требуют постоянного обновления

Необходимость изменения данных хранящихся в памяти требует применения запоминающих устройств с возможностью многократной перезаписи информации.

Из современных запоминающих устройств наиболее перспективным выглядит применение для хранения информации микросхем flash-памяти, имеющих все необходимые характеристики для применения в системах технической диагностики.

Немаловажным фактором является возможность произвольного доступа к данным, хранящимся в памяти, так как может потребоваться изменение лишь небольшой части информации. Кроме того, для уменьшения количества соединительных проводников желательно использовать память с последовательным вводом и выводом информации, что приведет также и к экономии выводов портов микроконтроллера, который будет управлять данной памятью. А так как микроконтроллеры с меньшим количеством портов, как правило, стоят дешевле то это приведет к снижению стоимости диагностической системы.

Из имеющихся микросхем flash-памяти для применения в подобных приложения могут подойти микросхемы последовательной памяти DataFlesh, выпускаемые фирмой «Atmel». Они имеют достаточно большой объем памяти при малых габаритах, высокую надежность, допускают множество циклов перезаписи информации, способны работать в достаточно широком интервале температур. Наличие в этих микросхемах последовательного интерфейса SPI (Serial Peripheral Interface) дает дополнительные преимущества при их использовании в составе диагностического комплекса. Страницы памяти микросхем DataFlesh имеют малый размер, что позволяет легко изменять данные без применения специальных буферных микросхем (обычно это микросхемы оперативной памяти). Сопряжение микросхемы flash-памяти (DataFlesh) с микроконтроллером (AVR) достаточно подробно рассматривается в разделе 4.4.2. данной диссертационной работы.

Выбор микросхем памяти относится к вопросам реализации диагностической системы, а в данной главе рассматриваются преимущественно теоретические вопросы¹.

В следующем разделе диссертации производится классификация и анализ современных методов прогнозирования технического состояния.

¹ Необходимо отметить, что теория должна способствовать выбору конкретной реализации системы, и вследствие этого бывает сложно рассматривать по отдельности теоретические и практические вопросы.

2.8.1. Обзор методов прогнозирования технического состояния

Существующие методы прогнозирования можно поделить на две большие группы. К первой группе относятся методы, использующие математический аппарат теории случайных функций (вероятностные методы прогнозирования), а ко второй методы, в основе которых лежит математический аппарат численного анализа. Кроме того, используются также и комбинированные методы прогнозирования, сочетающие в себе обе группы.

Строго говоря, любой метод прогнозирования является вероятностным, так как точно предсказать момент выхода контролируемого параметра за пределы установленных допусков не представляется возможным. Можно лишь говорить о прогнозировании момента потери работоспособности (или функционирования) с определенной вероятностью.

Однако каждая группа методом имеет свои специфические особенности, поэтому рассмотрение обеих групп целесообразно проводить по отдельности.

Практически все процессы, протекающие в радиоэлектронной аппаратуре, в том числе и возникновение различных отказов, зависит от многих факторов, которые обусловлены как внутренними свойствами аппаратуры, так и внешними условиями¹.

Вследствие этого изменение параметров во времени подчиняется случайным закономерностям, и сами параметры являются случайными величинами. Поэтому разбор методов прогнозирования технического состояния начнем с вероятностных методов.

Методы вероятностного прогнозирования [25] позволяют определить вероятность сохранения работоспособного состояния объекта технического диагностирования, либо наоборот вероятность наступления неработоспособного состояния.

В самых простейших случаях, когда имеются данные только о текущем техническом состоянии, можно предположить что в системе проявляется экспоненциальный закон распределения надежности. В этом случае вероятность безотказной работы в последующий временной интервал времени определяется выражением

$$P = \exp(-t/t_0) = \exp(-\lambda t) \quad (2.31)$$

где t_0 – среднее время безотказной работы, λ – интенсивность отказов.

Однако такой подход решения поставленной задачи крайне нецелесообразен², так как он не способен дать достаточно высокую достоверность прогнозирования.

¹ Например, от изменений параметров элементов возникших в результате нарушения электрических режимов, условий эксплуатации (таких как температура, влажность, вибрации и т.д.) или обусловленных естественными процессами старения (либо изнашивания, при наличии механических узлов).

² Особенно при его использовании в прогнозировании технического состояния авиационного радиоэлектронного оборудования, к которому предъявляются повышенные требования по надежности.

Более совершенные методы используют функции распределения вероятности нахождения параметров в заданном диапазоне в определенный момент времени [24].

Пусть диагностический параметр $U(t)$ (см. рис.2.23) представляет собой некоторую случайную величину U , с известным законом распределения $F_t(U)=P[U(t)<U]$.

Плотность распределения вероятностей параметра $U(t)$

$$w_t(U) = \frac{dF_t(U)}{dU} \quad (2.32)$$

Искомая вероятность выхода параметра $U(t)$ за пределы установленного допуска $U_{дон}$ в момент времени t при этом определяется выражением

$$P[U(t) < U_{дон}] = \int_{-\infty}^{U_{дон}} w_t(U) dU \quad (2.33)$$

Плотность вероятностей (2.32) случайной величины U может подчиняться различным законам распределения в зависимости от конкретного периода эксплуатации, условий работы аппаратуры или свойств конкретных элементов радиоэлектронного оборудования.

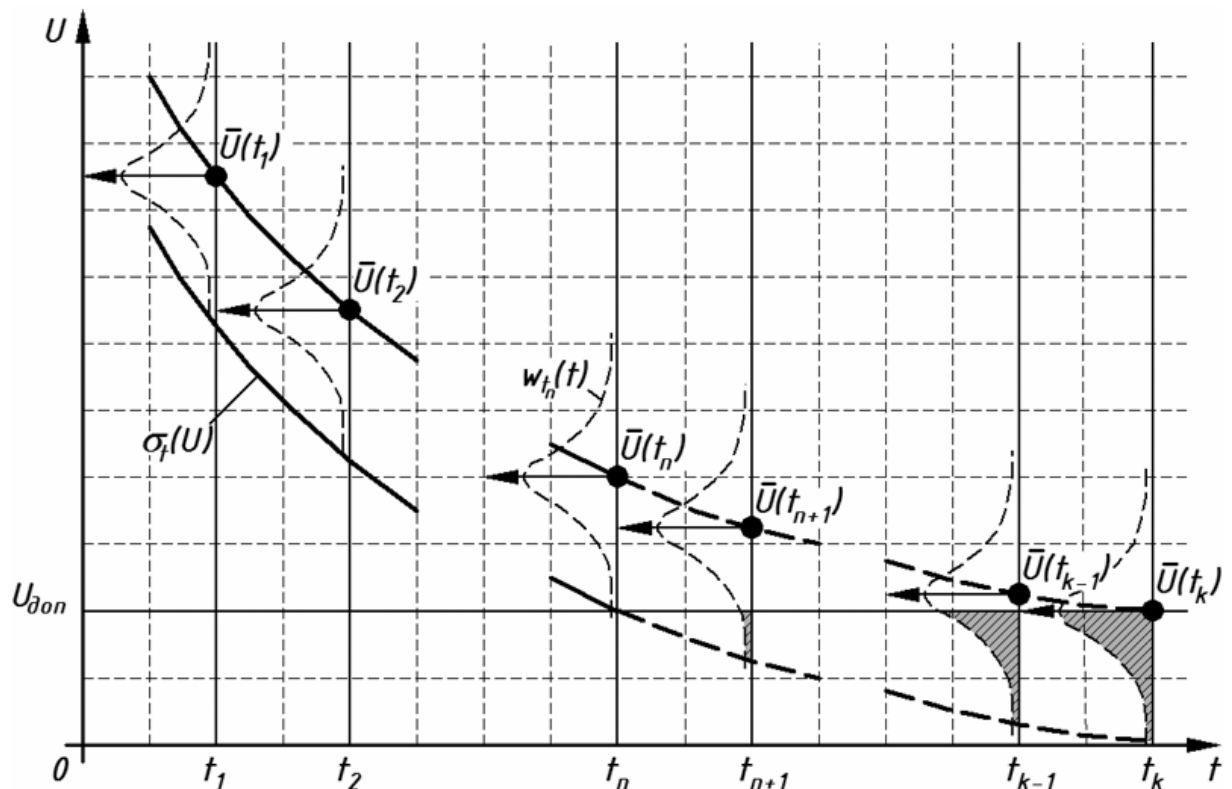


Рис.2.23. Прогнозирование технического состояния вероятностными методами.

На этапе приработки отказы радиоэлектронного оборудования часто подчиняются распределению Вейбулла (или экспоненциальному распределению, которое можно рассматривать как частный случай распределения Вейбулла) [33].

Поведение параметров радиоэлектронной аппаратуры с ярко выраженным эффектом старения или износа элементов достаточно хорошо описывает распределение Релея.

В период нормальной эксплуатации¹ в ряде случаев наблюдается либо нормальное, либо экспоненциальное распределение плотности вероятностей, а также распределение Пуассона (последнее бывает реже, в том случае, если поток отказов довольно простой).

Если плотность вероятности подчиняется нормальному распределению то

$$w_i(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i(U)} \exp\left\{-\frac{[U(t) - \bar{U}(t)]^2}{2\sigma_i^2(U)}\right\} \quad (2.34)$$

где $\bar{U}(t)$ – математическое ожидание случайной величины (среднее значение), а величина $\sigma_i(U)$ – ее среднеквадратическое отклонение.

Так как значения параметра берутся не во все моменты времени, то непрерывную случайную величину можно приближенно заменить дискретной, при этом математическое ожидание и дисперсия случайной величины можно определить по формулам

$$\bar{U}(t) = \sum_{i=1}^k U_i P_i \quad \text{и} \quad \sigma_i^2(U) = \sum_{i=1}^k P_i (U_i - \bar{U})^2 \quad (2.35) \text{ и } (2.36)$$

В общем случае вероятностные методы прогнозирования очень трудоемки, трудно поддаются алгоритмизации. Кроме того, они требуют знания статистических характеристик радиоэлектронного оборудования, что не всегда оказывается возможным.

Разумеется, можно применить аналитические методы расчета статистических параметров ((2.22)-(2.26)), однако и в этом случае пользоваться данными методами не всегда удобно. Кроме того, при этом может существенно снизиться достоверность полученных результатов прогнозирования, что приведет к снижению эффективности диагностической системы в целом, особенно если данные прогнозирования используются для коррекции алгоритмов определения текущего технического состояния или поиска места отказа.

Вследствие этого при решении задач прогнозирования технического состояния широко используются методы второй группы, к которым относятся методы прогнозирования на основе анализа определяющих параметров с помощью математического аппарата численного анализа (такие как методы аппроксимации экспериментальных данных).

Данные методы свободны от большинства недостатков присущих вероятностным методам прогнозирования и их использование в целях прогнозирования представляется весьма перспективным. Достоверность результатов прогнозирования технического состояния полученных с помощью методов численного анализа будет более высокой.

Именно поэтому данные методы рассматриваются отдельно от вероятностных методов прогнозирования в следующем разделе диссертации.

¹ При этом следует учитывать, что после проведения ремонта (или восстановления ресурса) радиоэлектронного оборудования закон распределения отказов может измениться.

2.8.2. Прогнозирование состояния методами численного анализа

Методы численного анализа позволяют провести прогнозирование технического состояния без учета вероятности отказа элементов входящих в состав объекта диагностирования (и прочих вероятностных характеристик радиоэлектронного оборудования).

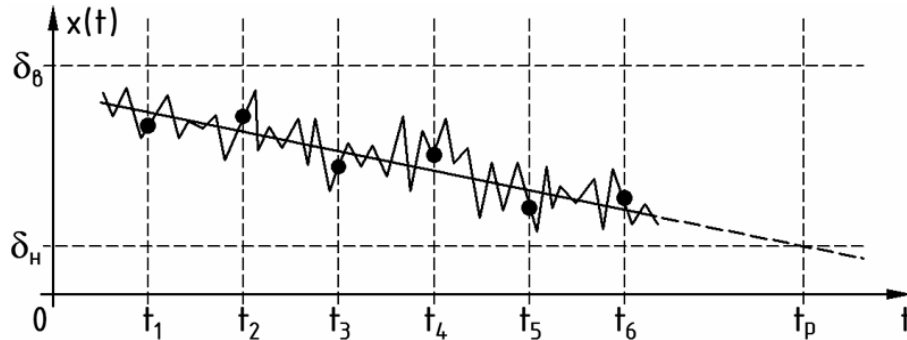


Рис.2.24. Определение время работоспособности объекта анализом одного из параметров.

Наличие данных о предыдущем состоянии при этом является обязательным условием. Причем здесь мы встречаемся с некоторым парадоксом. С одной стороны, чем больше имеется данных о предыдущем состоянии объекта, тем точнее можно предсказать его последующее состояние, а с другой избыточность данных может способствовать увеличению ошибки прогнозирования (это уже отмечалось в предыдущем разделе).

Например, на рис.2.24. представлен график изменения во времени $x(t)$ одного из диагностических параметров объекта x . Как видно из рисунка функция $x(t)$ содержит детерминированную и случайную составляющую. Случайная составляющая может быть обусловлена неточностью измерения диагностического параметра, случайными кратковременными изменениями параметров элементов в аппаратуре, изменением условий эксплуатации (например, температуры внешней среды), внутренними или внешними шумами, а также рядом других факторов. Собственно для целей прогнозирования интерес представляет в основном детерминированная составляющая функции изменения диагностического параметра. Если взято слишком мало экспериментальных данных то выявление детерминированной составляющей параметра усложнится, так как не будет компенсироваться случайная составляющая параметра, что приведет к погрешности вычислений.

Рассмотрим применение методов численного анализа для прогнозирования технического состояния. В частности, на рис.2.24 показывается нахождение времени работоспособности объекта t_p , путем анализа изменения диагностического параметра. Результаты измерений диагностического параметра аппроксимируются некоторой зависимостью, которая позволяет проводить экстраполирование данной функции и найти момент времени при котором ее значения выходят за пределы допусков δ_v и δ_n .

В случае, показанном на рис.2.24 результаты шести измерений аппроксимируются линейной зависимостью. Момент времени, в который заданный параметр выходит за пределы установленных допусков однозначно определяет время работоспособности объекта диагностирования (естественно определение момента выхода контролируемого параметра за пределы осуществляется только с определенной степенью достоверности).

Если имеется дополнительная информация о состоянии объекта, например производные по времени от диагностических параметров, или значения диагностических параметров во время предыдущих операций диагностирования то прогнозирование технического состояния объекта можно осуществить с большой степенью достоверности.

Для задач прогнозирования часто применяют полиномы Лагранжа и Ньютона (последний можно рассматривать как частный случай полинома Лагранжа при использовании отсчетов искомой функции взятых через равные промежутки времени) [49]. Также применяют и другие методы численного анализа, которых имеется огромное количество.

Из методов численного анализа [12] можно выделить несколько широко известных методов аппроксимации экспериментальных данных, в частности в данной диссертационной работе предлагается использовать для целей прогнозирования метод наименьших квадратов [38]. Пусть по данным измерений имеется несколько экспериментальных точек иными словами два вектора входных данных – значения аргумента и самой функции

$$\begin{aligned}\bar{X} &= X\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\} \\ \bar{Y} &= Y\{y_1, y_2, y_3, \dots, y_N\}\end{aligned}$$

Согласно положениям теории вероятности эти точки лучше всего аппроксимирует функция, имеющая минимальный квадрат отклонения от точек соответствующих экспериментальным данным. Пусть аппроксимирующая функция $y = f(x)$ тогда

$$\sum_{n=1}^N [y_n - f(x_n)]^2 \rightarrow \min \quad (2.37)$$

Для детального рассмотрения метода выберем функцию вида

$$f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x^1 + a_0 x^0 \quad (2.38)$$

Для задач интерполяции степень полинома (2.38) берут выше, так как в этом случае экспериментальные данные описываются более точно [25]. Однако если данный метод используется чтобы находить последующие значения функции, то есть проводить экстраполяцию значений, то степень полинома должна быть небольшая. Чем выше степень полинома, тем быстрее он изменяется за пределами экспериментального участка, и тем сложнее предсказать дальнейшее поведение функции. Соответственно будет падать и достоверность полученного прогноза, кроме того, существенно возрастет объем вычислений.

Глава 3. Современные средства технической диагностики

Развитие средств технического диагностирования позволяет создавать высокоэффективные системы технической диагностики авиационного радиоэлектронного оборудования, способные реализовывать сложные и гибкие алгоритмы диагностирования.

Особенно перспективно применение цифровых систем диагностики. Следует отметить тот факт, что на самом деле эти системы являются цифроаналоговыми, так как диагностические параметры представлены в большинстве случаев аналоговыми величинами, за исключением цифровых устройств. Соответственно сначала потребуются предварительная аналоговая обработка, а затем преобразование диагностического параметра в цифровую форму, и только после этого производится цифровая обработка параметров [48].

Особое значение при построении современных систем диагностики имеет применение для диагностирования персональных компьютеров (или аналогичных им). Использование компьютера позволяет применить для диагностики экспертные системы [51].

Однако экспертные системы не относятся к аппаратным средствам диагностики, рассматриваемым в данном разделе, поэтому вернемся к рассмотрению имеющихся в настоящее время технических средств диагностирования и составляющих этих средств.

Условно можно выделить следующие группы средств технической диагностики

- средства сбора и предварительной обработки диагностических данных;
- средства управления диагностической системой и обработки параметров;
- средства формирования тестовых сигналов;
- средства индикации результатов диагностики.

Условным данное деление является из-за того, что одно и то же устройство в зависимости от сложности системы может выполнять различные функции.

Например, при использовании микроконтроллера в системе встроенного контроля связной радиостанции он может управлять всей системой встроенного контроля и производить обработку определяющих диагностических параметров. В данном случае он служит средством управления и обработки диагностических данных. При использовании системы встроенного контроля совместно с персональным компьютером операции определения технического состояния проводятся на персональном компьютере. Микроконтроллер системы встроенного контроля при этом выполняет операции сбора и предварительной обработки параметров [52], необходимых для проведения технического диагностирования радиоэлектронного оборудования, то есть является средством сбора данных.

Следует отметить важность применения в системах диагностики накопителей информации [2], так как это позволит проводить прогнозирование технического состояния.

3.1. Средства сбора и предварительной обработки данных

Под средствами сбора и предварительной обработки диагностических сигналов следует понимать устройства участвующие в процессе получения сигналов от объекта диагностирования и передачу их средствам обработки диагностической информации.

В первую очередь к средствам подобного рода следует отнести различного рода коммутаторы сигналов, измерительные преобразователи и аналогичные им устройства.

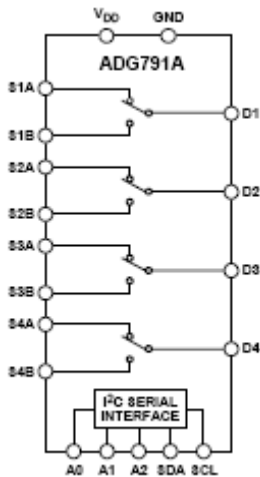


Рис.3.1. Функциональная схема коммутатора высокочастотных сигналов ADG791A

Коммутаторы необходимые при построении системы технического диагностирования могут быть нескольких типов, например, они могут быть аналоговыми и цифровыми.

Аналоговые коммутаторы в свою очередь можно классифицировать на коммутаторы высокочастотных сигналов и коммутаторы низкочастотных сигналов.

На сегодняшний день подобные аналоговые коммутаторы выпускают многие фирмы, однако наиболее широкую номенклатуру предоставляет фирма «Analog Devices».

Продукция данной фирмы очень разнообразна, и надо отметить что, используя только микросхемы данной фирмы (за исключением микроконтроллеров и микросхем памяти) можно построить диагностическую систему любой сложности. Кроме того, данная фирма выпускает коммутаторы, работающие с очень высокочастотными сигналами.

Например, аналоговый переключатель ADG791A данной фирмы способен обеспечивать коммутацию сигналов частотой до 325МГц. Для управления переключателем используется интерфейс I²C [47], что дает им дополнительные преимущества, особенно при наличии большого числа коммутаторов. Функциональная схема переключателя высокочастотных сигналов ADG791A приведена на рис.3.1. В ряде случаев может потребоваться использование простых высокочастотных ключей. Здесь можно применить микросхемы типа ADG901 или ADG902, способные коммутировать сигналы частотой до 4,5ГГц.

В четвертой главе данной диссертационной работы указывается на потребность использования в системах встроенного контроля микросхем смесителей. Микросхемы подобного типа также имеются в номенклатуре изделий данной фирмы, например AD8344.

К средствам предварительной обработки диагностических сигналов следует также отнести аналого-цифровые преобразователи, хотя использование отдельных микросхем может требоваться не всегда, так как многие современные микроконтроллеры (например, микроконтроллеры серии AVR) уже имеют свои встроенные преобразователи.

3.2. Средства управления и обработки параметров

В качестве средств обработки диагностических данных в современных системах технического диагностирования актуально использовать микроконтроллеры [1], которые одновременно могут выполнять и управление диагностической системой.

В настоящее время существует большой выбор различных микросхем микроконтроллеров, которые можно применять в системах диагностики. Все современные микроконтроллеры имеют в основном близкие функциональные возможности, и поэтому очень трудно сказать, что микроконтроллеры одной фирмы лучше, а другой хуже. Наиболее часто в прикладных задачах используют микроконтроллеры фирм «Microchip» и «Atmel».



Рис.3.2. Микроконтроллер PIC (Microchip) в корпусе DIP

Микроконтроллеры AVR [37] (рис.3.3) фирмы «Atmel» по сравнению с аналогичными по возможностям микроконтроллерами фирмы «Microchip» (рис.3.2) как правило, стоят несколько дешевле. Кроме того, необходимо отметить, что практически все микроконтроллеры семейства AVR имеют довольно широкую периферию [52].

Под периферией при этом понимаются встроенные аналого-цифровые преобразователи, таймеры, широтно-импульсные модуляторы, компараторы, универсальные синхронно-асинхронные приемопередатчики, сторожевые таймеры, SPI-интерфейс, восьмиразрядные (или большей разрядности) параллельные порты и т.д.



Рис.3.3. Микроконтроллер AVR (Atmel) в планарном корпусе

Семейство малогабаритных микроконтроллеров «Tiny» (на рис.3.4 показан один из микроконтроллеров этого семейства) фирмы «Atmel» можно применять при создании датчиков состояния для отдельных узлов сложной радиоэлектронной аппаратуры.



Рис.3.4. Микроконтроллер семейства Tiny

Данное семейство микроконтроллеров имеет миниатюрные корпуса с малым количеством выводов, и многие из них помимо обычных периферийных устройств имеют еще и встроенные датчики температуры, что дает им некоторые преимущества по сравнению с другими микроконтроллерами, так как при проведении технической диагностики отдельных узлов радиоэлектронной аппаратуры может потребоваться контроль температуры.

В ряде случаев от микроконтроллеров может требоваться очень высокое быстродействие, и тогда в диагностической системе можно применить DSP-микроконтроллеры¹.

Роль средства управления диагностической системой и обработки диагностических данных может выполнять и персональный компьютер, особенно в сочетании с микроконтроллерной системой сбора и предварительной обработки параметров [1].

Использование персонального компьютера помимо эффективного проведения самой диагностики позволяет легко реализовать развитый графический интерфейс, что упрощает взаимодействие оператора (человека) с системой технического диагностирования.

Реализовать развитый графический интерфейс, используя непосредственно только микроконтроллеры значительно сложнее и, кроме того, это возможно не на всех типах микроконтроллеров. Графический интерфейс требует применения микроконтроллеров с высокой разрядностью и больших трудозатрат на их программирование. При создании диагностической программы на персональном компьютере имеется возможность использования визуальных языков программирования, например Borland Delphi [92] или Visual C, в то время как при программировании микроконтроллеров используются ассемблер и в лучшем случае языки программирования высокого уровня, чаще всего это язык С [55].

Помимо графического интерфейса применение персонального компьютера позволит реализовать более сложные и эффективные алгоритмы технического диагностирования, а также применить в целях диагностирования экспертные системы [68]. Применение экспертных систем в диагностике намного упрощает этап интерпретации результатов диагностирования. Соответственно будет сокращаться время простоя оборудования, повышается оперативность проведения технического обслуживания.

Экспертная система при этом должна иметь возможность самообучения, точнее, возможность расширения и корректировки своей базы данных. В случае отсутствия такой возможности эффективность использования системы будет значительно ниже.

Вопрос о выборе средств управления и обработки диагностических данных в каждом конкретном случае решается по-разному в зависимости от задач поставленных перед диагностической системой, стоимости средств диагностирования и других факторов.

¹ DSP от англ. Digital Signal Processing – Цифровые Сигнальные Процессоры.

3.3. Генераторы тестовых сигналов

Вопрос выбора генераторов тестовых сигналов является одним из основных при построении системы тестового или функционально-тестового диагностирования. При этом следует учитывать современные тенденции развития средств технического диагностирования. Так как современные диагностические системы строятся в основном с применением микроконтроллеров, или (и) персонального компьютера, то следует обеспечить возможность управления генератором тестовых сигналов именно от них.

На основании проведенного анализа современных средств генерации сигналов был сделан вывод, что для решения поставленных задач наиболее подходят синтезаторы частоты с прямым цифровым синтезом (Direct Digital Synthesis – DDS) [56].

В настоящее время DDS-синтезаторы относятся к наиболее передовым достижениям в технике формирования сигналов [97], и имеют большие перспективы. Эти синтезаторы выполнены в виде отдельной микросхемы и имеют обобщенную структурную схему, показанную на рис.3.5 (эта схема приведена в документации фирмы «Analog Devices»).

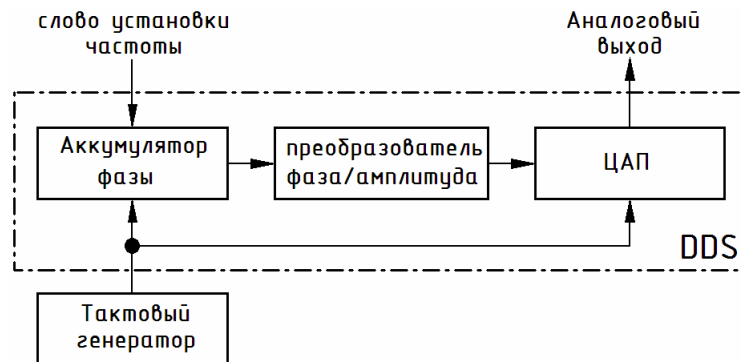


Рис.3.5. Обобщенная структурная схема DDS-синтезатора.

Принцип его работы заключается в накоплении в аккумуляторе значения фазы, а затем преобразования текущего значения фазы в мгновенную амплитуду, значение которой подается на вход ЦАП. С каждым импульсом, полученным от опорного генератора (рис.3.6, а), содержимое аккумулятора фазы увеличивается на некоторую величину, которую мы устанавливаем в регистре установки частоты (слово установки частоты). При достижении максимального значения (то есть при его переполнении) аккумулятор фазы сбрасывается в ноль, и весь цикл повторяется сначала (рис.3.6, б). Далее цифровая последовательность поступает на адресные входы ПЗУ, в котором хранятся значения синуса для всех дискретных значений фазы, которые могут быть получены в аккумуляторе фазы.

Цифровая последовательность с выхода ПЗУ (рис.3.6, в) попадает в ЦАП, где преобразовывается в аналоговый выходной сигнал, который после некоторой фильтрации (рис.3.6, г) может быть непосредственно использован.

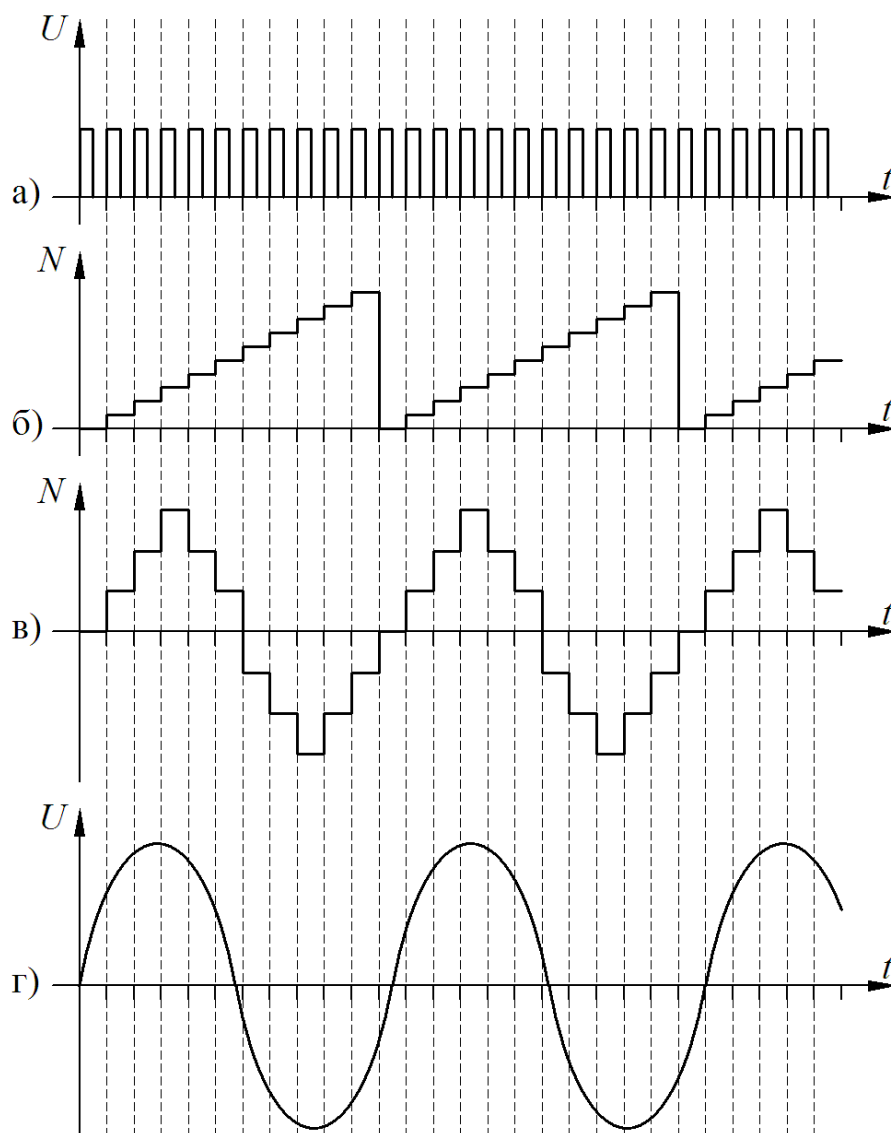


Рис.3.6. Графики, поясняющие работу DDS-синтезатора.

Приращение значения в аккумуляторе фазы эквивалентно вращению вектора напряжения, благодаря приращению фазы $\Delta\varphi$, что поясняется на рис.3.7. Круговая частота ω характеризуется скоростью изменения фазы и определяется выражением $\omega = d\varphi/dt$, и вследствие того, что скорость изменения угла постоянная можно записать $\omega = \Delta\varphi/\Delta t$.

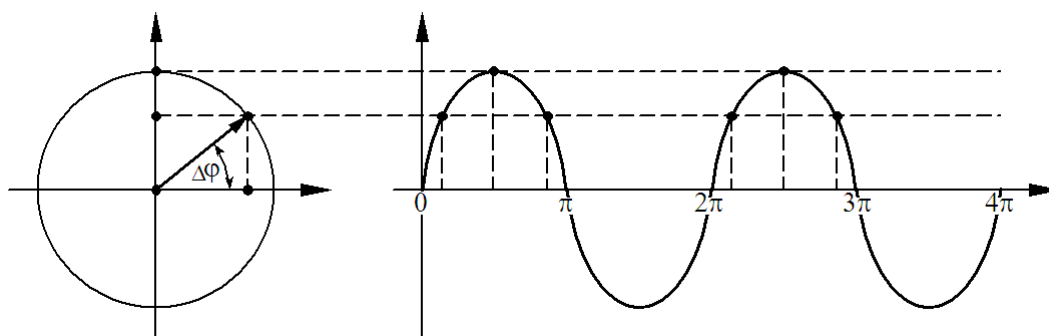


Рис.3.3.3. Пояснение работы DDS-синтезатора вращением вектора напряжения.

Учитывая что $\Delta\varphi = n \cdot \delta\varphi$, где n – число дискретных приращений фазы $\delta\varphi$ за время Δt , можно записать выражение для выходной частоты синтезатора в виде

$$\omega_{DDS} = n \cdot \frac{\delta\varphi}{\Delta t} = \frac{\Delta t}{T_{CLK}} \frac{\delta\varphi}{\Delta t} = f_{CLK} \cdot \delta\varphi, \quad (3.1)$$

где $f_{CLK} = 1/T_{CLK}$ — частота опорного (тактового) сигнала с периодом T_{CLK} .

Таким образом, выходная частота DDS-синтезатора составит

$$f_{DDS} = \frac{f_{CLK} \cdot \delta\varphi}{2\pi} \quad (3.2)$$

Величина приращения фазы $\delta\varphi$ определяется количеством отсчетов значений фазы за период колебания. Значению фазы в 360° соответствует число $A_m = 2^m - 1$, где m — разрядность аккумулятора фазы. Тогда приращение фазы определится выражением

$$\delta\varphi = (2\pi \cdot A'_m) / A_m, \quad (3.3)$$

здесь A'_m — число, записанное в аккумулятор фазы (слово настройки).

Например, для разрядности $m = 32$ минимальное приращение фазы будет

$$\delta\varphi_{min} = \frac{2\pi}{4294967295} \approx 1,463 \cdot 10^{-9}.$$

С учетом выражения (3.3) перепишем выражение для определения выходной частоты синтезатора (3.2), которое будет выглядеть следующим образом

$$f_{DDS} = \frac{f_{CLK} \cdot A'_m \cdot 2\pi}{A_m \cdot 2\pi} = \frac{f_{CLK} \cdot A'_m}{A_m}. \quad (3.4)$$

Для примера вычислим, какую минимальную частоту можно получить (согласно выражению (3.4)), вырабатывая сигнал с помощью синтезатора DDS имеющего разрядность аккумулятора фазы $m = 32$, и при опорной частоте равной 300 МГц

$$f_{DDS/MIN} \approx \frac{300 \cdot 10^6 \cdot 2,33 \cdot 10^{-10} \cdot 2 \cdot 3,14159}{2 \cdot 3,14159} \approx 0,0699 \text{ Гц}.$$

Максимальное значение приращения фазы за один такт выбирают так, чтобы переполнение аккумулятора фазы произошло не менее чем через два такта опорного генератора (это определяется теоремой отсчетов – частота полученного сигнала не может быть более половины частоты опорного генератора). Если непосредственно устанавливать частоту выходного сигнала, а не приращение фазы за один такт опорного генератора, то такие малые значения частоты выходного сигнала получить будет сложнее, так как потребуется либо увеличение разрядности аккумулятора, либо ограничение по максимальной частоте.

Прежде чем решить вопрос об использовании DDS-синтезатора в качестве генератора диагностических воздействий следует провести небольшой анализ его сигнала.

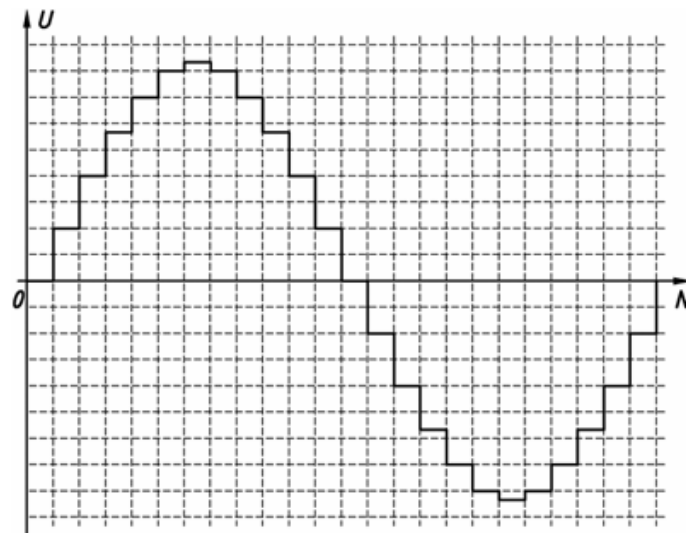


Рис.3.8. Выходной сигнал DDS-синтезатора.

Выходной сигнал DDS-синтезатора не чисто синусоидальное колебание, а сигнал ступенчатой формы (см. рис.3.8). Следовательно, в состав сигнала будет входить множество гармоник. На рис.3.9 представлен амплитудный спектр данного сигнала.

Спектр выходного сигнала получен с помощью дискретного преобразования Фурье (4.4), поэтому гармоники вокруг главного пика частично возникают за счет так называемого эффекта размазывания спектра и частично действительно из-за формы сигнала.

В окрестности малых пиков также есть некоторое смазывание, но амплитуды этих гармоник настолько малы, что на рисунке они не показаны.

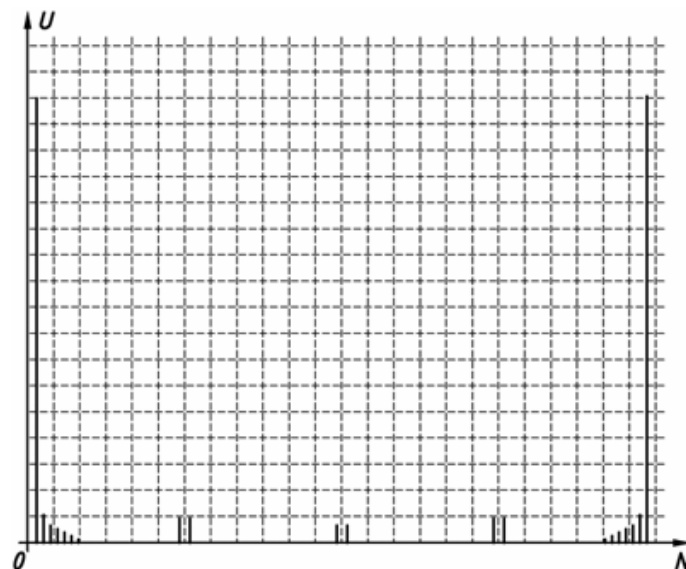


Рис.3.9. Спектр выходного сигнала DDS-синтезатора.

Как видно из рис.3.9. фильтрация выходного сигнала DDS-синтезатора не представляет проблем, причем параметры фильтра определяются в основном частотой тактового сигнала и он может быть одним и тем же для всех генерируемых частот. Вопросы практического использования DDS-синтезаторов рассматриваются в четвертой главе.

3.4. Устройства отображения информации

В современных системах технической диагностики возможно применение самых различных устройств отображения диагностической информации, которые будут отличаться в зависимости от сложности системы и совокупности решаемых ею задач.



Рис.3.10. Светодиоды

В простейших системах диагностирования показывающих работоспособно оборудование или нет, можно применить в качестве устройств отображения диагностической информации светодиоды (см. рис.3.10). Такими диагностическими системами является большинство систем встроенного контроля бортового радиосвязного оборудования (впрочем, не только радиосвязного, а и всех видов бортового радиоэлектронного оборудования).

Например, работоспособное состояние радиоэлектронного оборудования может индцироваться зеленым, а неработоспособное состояние красным светодиодом и т.д.

В более сложных системах встроенной диагностики и контроля, показывающих не только текущее техническое состояние радиоэлектронной системы, но указывающих на неработоспособный блок в случае возникновения отказа, такая система индикации будет неэффективна. В данном случае больше подходят семисегментные индикаторы, показанные на рис.3.11.

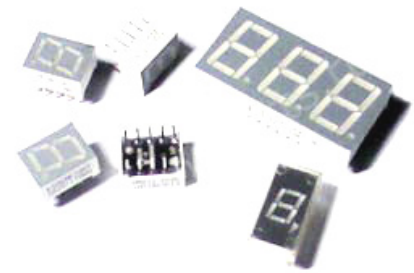


Рис.3.11. Семисегментные индикаторы

В системах диагностики с выдачей какой-либо дополнительной информации, например с подробным описанием характера отказа элемента системы, применения семисегментных индикаторов может оказаться недостаточно. Тогда в качестве устройства отображения результатов диагностирования можно использовать жидкокристаллические дисплеи, возможности которых очень большие.



Рис.3.12. Многофункциональный индикатор (типа МФИ-ЖК2)

Наконец, в случае применения в целях диагностики персонального компьютера устройством вывода результатов будет служить его монитор. Кроме того, актуально выводить диагностическую информацию на многофункциональные индикаторы (см. рис.3.12.) расположенные на приборной панели в кабине пилота, для того чтобы экипаж постоянно имел информацию о правильности функционирования (или работоспособности) оборудования.

Глава 4. Принципы построения системы комплексной диагностики

Разработанные в настоящее время системы диагностики радиосвязного оборудования, при условии их наличия, довольно сложные и имеют в своем составе очень большое количество элементов. Разумеется, что имеются в виду системы производящие комплексную диагностику радиостанции, а не простые устройства встроенного контроля, однако и они не всегда выполняют полный контроль и анализ состояния радиостанции. Вследствие постоянного совершенствования научно-технической базы диагностики появляется возможность создавать более эффективные системы технического диагностирования.

Принципы построения комплексной системы диагностики рассмотрим на примере радиостанции «Баклан» [67]. Прежде всего, стоит выяснить наличие в радиостанции уже имеющихся собственных средств встроенного контроля и выявить их недостатки.

Говоря о наличии средств встроенного контроля в радиостанции «Баклан», можно отметить, что практически их нет. Работоспособность радиостанции проверяется на слух, по сигналам с выхода детектора самопрослушивания. В радиостанции предусмотрен контроль работоспособности синтезатора сетки частот (в самом же синтезаторе) с автоматическим отключением передатчика в случае отказа синтезатора сетки частот. При этом, однако, во внешние устройства сигнал об отказе синтезатора не выдается.

Основной современной тенденцией развития средств технического диагностирования, является построение диагностической системы на базе персонального компьютера.

В частности возможно использование системы встроенного контроля для сбора данных с датчиков и передачи полученной информации на персональный компьютер для последующей обработки с помощью специализированных программных средств.

Совершенно очевидна необходимость построения аппаратуры встроенного контроля на базе микроконтроллеров, причем желательно имеющих развитую периферию, так как это устраняет необходимость применения дополнительных микросхем (низкоскоростных АЦП, компараторов и т.д.) и упрощает построение системы. Для этой цели подходят, например, микроконтроллеры AVR фирмы Atmel или PIC фирмы Microchip.

На основе выше изложенного, обобщенная структурная схема предлагаемой диагностической системы в составе радиостанции будет иметь вид, приведенный на рис.4.1.

Устройство встроенного контроля (УВК) осуществляет контроль параметров основных блоков радиостанции. В обычном режиме УВК осуществляет контроль работоспособности блоков, и в случае обнаружения отказа выдает сигнал на систему индикации.

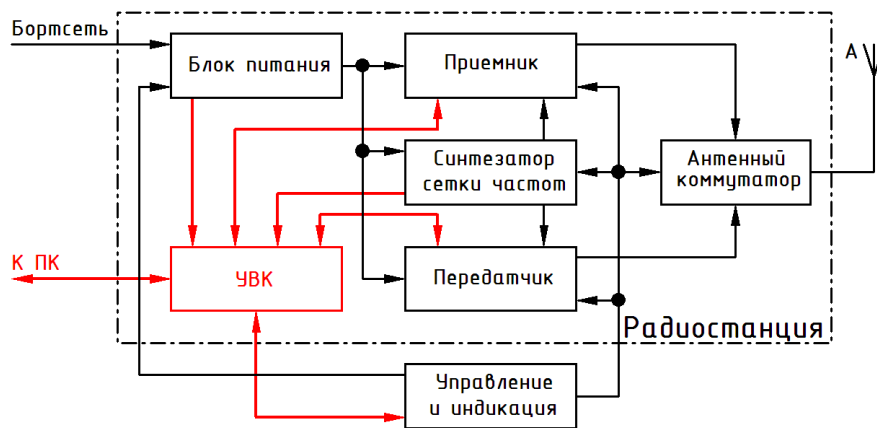


Рис.4.1. Обобщенная схема диагностической системы.

В расширенном режиме устройство встроенного контроля производит диагностику блоков согласно алгоритму, задаваемому с персонального компьютера.

Какие параметры будут проверяться устройством встроенного контроля, а какие будут подвергаться обработке на персональном компьютере, зависит от значимости параметров и от легкости их анализа, который может быть очень сложным.

Принцип работы и назначение радиосвязного оборудования также играют не последнюю роль. Рассмотрим в качестве примера прибор контроля и диагностики АРМ (см. рис.4.2), предназначенный для проверки аварийных радиомаяков для работы с системой КОСПАС/SARSAT в соответствии с процедурами технического обслуживания рекомендованными комитетом КОСПАС/SARSAT. Для проведения диагностики аварийного радиомаяка используется экранированное помещение с габаритными размерами 6×6×2,5м.



Рис.4.2. Прибор контроля и диагностики АРБ.

Данная система технической диагностики может быть отнесена к системам с внешними средствами диагностирования, причем возможно использование контактного или бесконтактного метода определения диагностических параметров (измерения проводятся через контактный разъем АРБ или через эфир).

Тестирование производится в нескольких режимах: автоматически или выбранные параметры контролируются по отдельности. Прибор работает от автономного источника питания и от блока питания, представляющего собой зарядное устройство.

Результаты тестирования отображаются на дисплее и, кроме этого, имеется возможность вывода диагностической информации на специальный принтер (он предназначен для работы только с данной системой). Принтер в стандартный комплект поставки не входит и заказывается дополнительно.

По условиям эксплуатации прибор предназначен для работы при температуре – 15°С...+55°С, относительной влажности воздуха до 95%. Габаритные размеры прибора без антенны: 200×75×45 мм. Масса 1,5кг.

Прибор может также проверять радиомаяки, имеющие в своем составе аварийную радиостанцию, работающую на частоте 121,5 МГц.

Прибор позволяет производить:

- измерение ¹несущей частоты 406 МГц;
- определение наличия несущей частоты 121,5 МГц;
- измерение значений положительной и отрицательной фазы модулированного сигнала;
- оценку длительности сообщения на частоте 406 МГц;
- оценку длительности немодулированной преамбулы на частоте 406 МГц;
- измерение мощности сигнала на частоте 406 МГц;
- измерение мощности сигнала на частоте 121,5 МГц;
- определение наличия свип-тона;
- полную расшифровку принятой аварийной информации по каналу 406 МГц по всем типам протоколов, соответствующих рекомендациям C/S T-001;
- распечатку протокола проверки АРБ;
- проверку параметров АРБ как через разъем (с использованием эквивалента антенны), так и через антенну по эфиру.

Диагностика радиосвязной радиостанции также имеет свои особенности. Рассмотрим, например диагностику радиоприемной части радиостанции. Одним из важнейших параметров является номинал и стабильность частоты гетеродина смесителя, в роли которого обычно выступает синтезатор сетки частот. Надо отметить, что контроль этого параметра довольно затруднен, особенно оценка кратковременной стабильности частоты. Основная часть фильтрации часто осуществляется в тракте усиления промежуточной частоты, вследствие чего он представляет собой один из важнейших блоков приемника радиостанции. Работу тракта усиления промежуточной частоты можно оценить по тому, как через него проходят сигналы на разных частотах, иначе говоря, работа усилителя промежуточной частоты характеризуется его амплитудно-частотной характеристикой.

При проведении диагностики частот возникает вопрос, как получить требуемую информацию, заложенную в сигнале объекта диагностирования. Вопросы обработки диагностического сигнала (и определение, какие методы при этом следует использовать) являются предметом исследований следующего раздела диссертации.

¹ Материал был взят с сайта <http://www.mussonmarine.com>

4.1. Методы получения и обработки диагностических параметров

Для обработки откликов системы полученных после прохождения через ее цепи диагностического сигнала можно применять различные методы и способы их анализа.

Основным элементом получения информации является датчик. Под датчиком при этом понимают всякий измерительный преобразователь, который выполняет преобразование информации от исследуемого объекта в форму удобную для последующей обработки этого параметра и его анализа. Каждый датчик характеризуется разными показателями, в зависимости от его конструктивных особенностей, выполняемых им операций и многих других факторов. Из параметров датчиков можно выделить несколько основных, которые с равной степенью относятся ко всем типам датчиков.

Основной характеристикой датчика является его погрешность (абсолютная и относительная) и функциональная зависимость выходного сигнала от измеряемой физической величины [33]. К характеристикам датчика как средства получения информации следует также отнести его информационную способность, определяемую выражением

$$I = \log\left(\frac{100}{2\sigma} + 1\right) = \log(100 + 2\sigma) - \log(2\sigma), \quad (4.1)$$

где σ – относительная погрешность датчика в процентах.

Для сигнала являющимся физическим носителем информации одними из основных параметров являются – спектральный состав, мощность, уровень шумов, длительность, амплитуда, фаза, частота, коэффициент модуляции и некоторые другие характеристики.

Спектральный анализ состава сигнала позволяет получить наиболее полную и подробную характеристику сигнала. При реализации спектрального анализа на компьютере или микроконтроллере необходимо применение дискретного преобразования Фурье [11].

Дискретное преобразование Фурье позволяет найти спектр сигнала представленного в дискретном виде. Спектр сигнала позволяет получить отражение сигнала в частотной области, что позволяет оценивать частотный состав сигнала. Обычно в литературе дискретное преобразование Фурье выводится из комплексного ряда Фурье [19], между тем существует довольно простое пояснение выполнения дискретного преобразования Фурье, основанное на вычислении интегрального преобразования Фурье численными методами.

Предположим, что преобразованию Фурье подвергается непрерывный сигнал $x(t)$ (рис.4.3, а), тогда можно записать преобразование Фурье в виде

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (4.2)$$

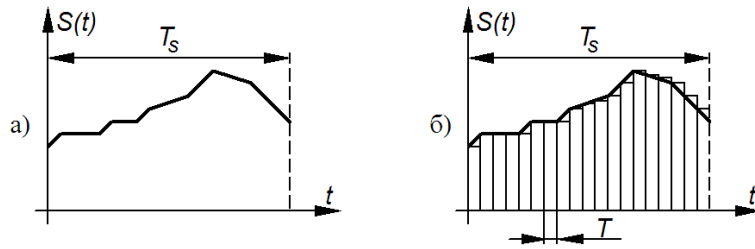


Рис.4.3. К пояснению выполнения преобразования Фурье численным методом.

Интеграл (4.2), как и любой другой можно вычислить численным методом, например, методом прямоугольников. При этом осуществляется переход от непрерывного сигнала к дискретному сигналу: $x(t) \rightarrow x(nT)$, $dt \rightarrow T$. При вычислении методом прямоугольников (рис.4.3, б) непрерывный интеграл заменяется конечной суммой [38], и выражение (4.2) преобразуется в следующий вид

$$S(\omega) = T \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT) e^{-j\omega nT}, \quad (4.3)$$

Надо отметить, что при анализе ограниченного по времени реального сигнала возникает некоторое противоречие. Так как сигнал финитный по времени то спектр его бесконечен, но с другой стороны спектр сигнала все же ограничен полосой пропускания цепей, по которым он проходит. То есть он уже изначально не является бесконечным. Та же проблема возникает при обратном преобразовании Фурье. Для решения этой проблемы прибегают к некоторым допущениям, которые исключают эти несоответствия. Так как сигнал за пределами анализируемого участка нам неизвестен, то считают, что сигнал снова повторяется, то есть сигнал представляют как периодический (см. рис.4.4).

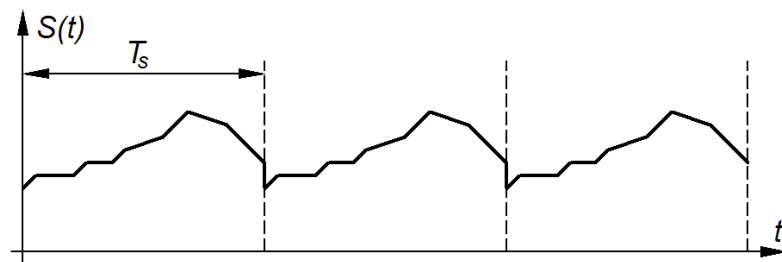


Рис.4.4. Представление ограниченного по времени сигнала как периодического.

Подобное допущение снимает приведенные выше противоречия, и может быть корректно выполнено как прямое, так и обратное преобразование Фурье. При этом сущность рассуждений не теряется, сигнал может и повторяться, но мы этого просто не знаем.

При этом прямое преобразование Фурье запишется в виде

$$S(k\Omega) = T \sum_{n=1}^N x(nT) e^{-j2\pi \frac{kn}{N}}, \quad (4.4)$$

Обратное преобразование Фурье определяется выражением

$$x(nT) = \frac{1}{NT} \sum_{k=1}^N S(k\Omega) e^{j2\pi \frac{kn}{N}}. \quad (4.5)$$

В результате мы имеем выражения для вычисления прямого дискретного преобразования (4.4) и обратного дискретного преобразования Фурье (4.5). Однако следует отметить, что вычисление спектра по прямой формуле дискретного преобразования Фурье весьма трудоемкое мероприятие [8]. При вычислении прямым способом потребуется $N(N+N) = 2N^2$ операций¹, поэтому вместо того чтобы вычислять спектр сигнала по выражению (4.3) используют так называемое быстрое преобразование Фурье (БПФ).

Быстрое преобразование Фурье это не новый вид преобразования Фурье, а лишь группа алгоритмов позволяющих снизить количество операций необходимых для вычисления дискретного преобразования Фурье [42]. Выделяют две большие группы алгоритмов быстрого преобразования Фурье – с временной и частотной децимацией² [35].

Дискретное преобразование Фурье определяется выражением (4.4).

Для простоты записи введем новое обозначение

$$e^{-\frac{2\pi}{N}nk} = W_N^{nk} \quad (4.6)$$

Опустим коэффициент T . Тогда (4.4) с учетом (4.6) можем записать в виде

$$s(k) = \sum_{n=1}^N x(n) W_N^{nk} \quad (4.7)$$

Наиболее часто используется алгоритм Тьюки-Кули [17, 18] по основанию два, который кратко рассматривается ниже. Разложим сумму (4.7) на две суммы – одна пусть содержит четные отсчеты, а вторая нечетные, в результате получим выражение

$$s(k) = \sum_{n=1}^{N/2} x(2n-1) W_N^{(2n-1)k} + \sum_{n=1}^{N/2} x(2n) W_N^{2nk}$$

или перепишем в виде

$$s(k) = \sum_{n=1}^{N/2} x(2n-1) W_N^{2nk} W_N^{-k} + \sum_{n=1}^{N/2} x(2n) W_N^{2nk}$$

заметим, что $W_N^{mk} = W_{N/m}^k$ и W_N^{-k} не зависит от n , запишем

$$s(k) = W_N^{-k} \sum_{n=1}^{N/2} x(2n-1) W_{N/2}^{nk} + \sum_{n=1}^{N/2} x(2n) W_{N/2}^{nk} \quad (4.8)$$

¹ Под операциями подразумеваются сложение и умножение, которые в общем случае комплексные.

² Или говорят с прореживанием по времени и с прореживанием по частоте.

Таким образом, N -точечное преобразование Фурье мы представили как сумму двух $N/2$ -точечных преобразований. Это можно рассматривать как вычисление дискретного преобразования Фурье от двух последовательностей $y(n) = x(2n-1)$ и $z(n) = x(2n)$.

$$s(k) = W_N^{-k} \sum_{n=1}^{N/2} y(n) W_{N/2}^{nk} + \sum_{n=1}^{N/2} z(n) W_{N/2}^{nk} \quad (4.9)$$

То есть, вычисляем отдельно два $N/2$ -точечных преобразования, а затем их объединяем. Следует также обратить внимание на то что

$$W_N^{-\left(k+\frac{N}{2}\right)} = e^{j\frac{2\pi}{N}\left(k+\frac{N}{2}\right)} = e^{j\frac{2\pi}{N}k + j\pi} = e^{j\frac{2\pi}{N}k} \cdot e^{j\pi} = -e^{j\frac{2\pi}{N}k} = -W_N^{-k} \quad (4.10)$$

Это означает, что нет смысла вычислять гармоники с номера $N/2$, так как спектр гармоник с номерами от $N/2$ до $N-1$ будет симметричен уже вычисленному спектру.

Если $N = 2^m$ то, производя аналогичным образом дальнейшее разложение можно N -точечное преобразование свести к вычислению двухточечных преобразований [43]. На рис.4.5. этот процесс поясняется графически (для восьмиточечного преобразования).

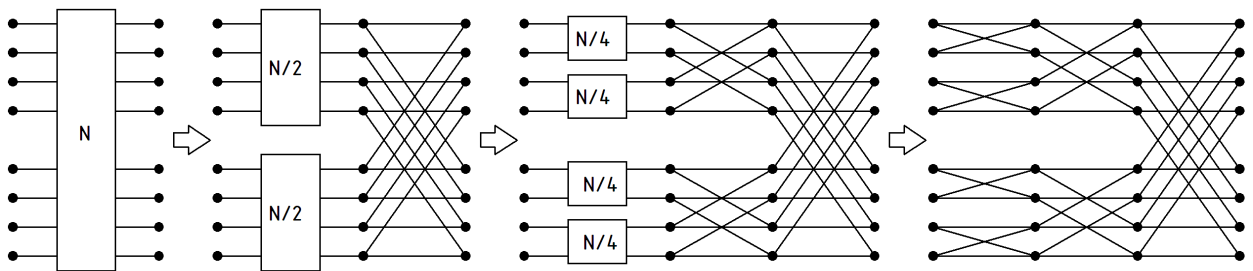


Рис.4.5. Пояснение быстрого преобразования Фурье.

Базовая операция БПФ называется «бабочкой» («butterfly») (см. рис.4.6).

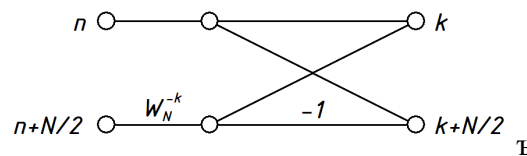


Рис.4.6. «Бабочка» быстрого преобразования Фурье с прореживанием по времени.

Для запоминания поворачивающих множителей W_N^{-k} понадобится массив, состоящий из комплексных ячеек, а так как сами они комплексные то можно записать

$$W_N^{-k} = e^{j\frac{2\pi}{N}k} = \cos(2\pi k/N) + j \sin(2\pi k/N) = a + jb \quad (4.11)$$

Количество операций необходимых для выполнения быстрого преобразования Фурье по алгоритму, описанному выше, составит всего $N \cdot \log_2 N$.

Код разработанной подпрограммы быстрого преобразования Фурье, написанный на языке Delphi, приведен в Приложении 2. Сама подпрограмма вынесена в отдельную дина-

мическую библиотеку, в которую включены также функции для выполнения операций с комплексными числами и подпрограмма вычисления дискретного преобразования Фурье.

Шумовые характеристики радиооборудования также представляют определенный интерес при решении диагностических задач. Например, по известной интенсивности внутренних шумов в некоторой полосе частот можно определить предельную чувствительность радиоприемного устройства, которая определяется выражением

$$\gamma_{\min} = N_{ш}KT\Delta f \quad (4.12)$$

здесь $N_{ш}$ – коэффициент шума; K – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; Δf – полоса пропускания приемника.

При создании системы диагностики связной радиостанции возникает вопрос, как определить и измерить глубину модуляции сигнала, как правило, с амплитудной или балансной модуляцией. Рассмотрим более детально случай простого амплитудно-модулированного сигнала, так большинство радиостанций имеет этот режим работы.

Часто параметры амплитудно-модулированного сигнала определяют, предварительно детектируя его амплитудным детектором. Изменяя параметры огибающей, определяют глубину модуляции сигнала, и возможно его амплитуду. Однако после детектирования получается не сама образующая, а лишь приближенное ее выражение.

Рассмотрим простейший диодный амплитудный детектор (рис.4.7), работа которого основана на нелинейности вольтамперной характеристики диода (надо отметить, что приведенные ниже выкладки будут справедливы и для транзисторных детекторов).

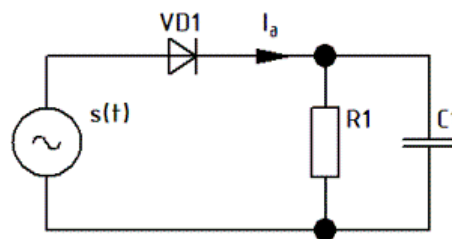


Рис.4.7. Диодный амплитудный детектор.

Вольтамперную характеристику диода детектора можно аппроксимировать зависимостью известной из микроэлектроники.

$$I_{\delta} = I_0(e^{U_{\delta}/\varphi_T} + 1) = I_0e^{U_{\delta}/\varphi_T} + I_0 \quad (4.13)$$

здесь φ_T – температурный потенциал, I_0 – начальный ток диода.

Разложим функцию (4.13) в ряд Тейлора в окрестности точки $U_{\delta} = 0$, и ограничимся первыми тремя членами разложения. В результате получим

$$I_{\delta} = I_0 \left(2 + \frac{I_0}{\varphi_T} U_{\delta} + \frac{I_0}{2\varphi_T^2} U_{\delta}^2 \right) = I_{\delta 0} + k_1 U_{\delta} + k_2 U_{\delta}^2 \quad (4.14)$$

Если напряжение на диоде представляет собой амплитудно-модулированное колебание (для простоты изложения рассмотрим однотональную модуляцию)

$$u(t) = U_0(1 + M \cos \Omega t) \cos \omega t = f(t) \cos \omega t \quad (4.15)$$

Пренебрегая начальным током диода I_0 , из (4.14), с учетом (4.15) получим

$$i(t) \approx k_1 f(t) \cos \omega t + \frac{1}{2} k_2 f(t)^2 \cos 2\omega t + \frac{1}{2} k_2 f(t)^2 \quad (4.16)$$

Высокочастотные составляющие сигнала с частотами ω и 2ω фильтруются, и выходное детектора будет приближенно определяться выражением

$$U_{\text{вых}} \approx R_n \frac{k_2 U_0^2}{2} (1 + M \cos \Omega t)^2 = R_n \frac{k_2 U_0^2}{2} \left(1 + 2M \cos \Omega t + \frac{M^2}{2} \cos 2\Omega t + \frac{M^2}{2} \right), \quad (4.17)$$

где R_n – сопротивление нагрузки детектора.

Заметим, что в этом случае точного значения напряжения не добиться. Коэффициент гармоник (отношение амплитуд второй и первой гармоник) составит

$$K_g = M/4$$

Например, глубина модуляции сигнала в радиостанции «Баклан» имеет типовое значение 0,85, и при этом получим $K_g = 0,2125$, то есть погрешность составит 21% без учета погрешностей связанных с фильтрацией высокочастотных составляющих и неточностью аппроксимации характеристики диода. Кроме того, при детектировании реального сигнала появятся и другие гармонические составляющие, как вследствие того, что сигнал не однотональный, так и из-за взаимодействий сигнала с шумом.

Разумеется, измерительное устройство можно градуировать таким образом, что данная погрешность будет компенсироваться, но тогда такая градуировка потребуется и при установке системы на другую радиостанцию вследствие того, что радиостанции не могут быть абсолютно идентичными.

Такое решение для систем диагностики неоптимальное, и необходимо искать другие пути определения параметров амплитудно-модулированного сигнала.

Решением может стать использование синхронного детектирования.

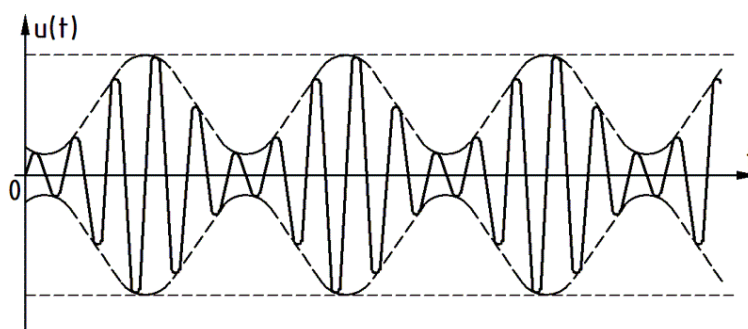


Рис.4.8. Амплитудно-модулированный сигнал.

Пусть амплитудно-модулированный сигнал (рис.4.8) вида

$$u(t) = U_0(1 + M \cos \Omega t) \cos \omega t$$

поступает на вход аналогового умножителя, на выходе которого будем иметь

$$u_{II}(t) = U_0 \cdot U_2 \cdot (1 + M \cos \Omega t) \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (4.18)$$

где U_2 – амплитуда напряжения гетеродина; φ_0 – его начальная фаза.

Запишем выражение определяемое (4.18) иначе

$$u_{II}(t) = U_0 \cdot U_2 \cdot (1 + M \cos \Omega t) \cdot \left[\frac{\cos(\varphi_0) + \cos(2\omega t + \varphi_0)}{2} \right] \quad (4.19)$$

После фильтрации останется только низкочастотная составляющая сигнала

$$u_{\text{вых}}(t) = \frac{U_0 \cdot U_2 \cdot \cos(\varphi_0)}{2} \cdot (1 + M \cos \Omega t) = k(1 + M \cos \Omega t) \quad (4.20)$$

Полученный сигнал (4.20) легко подвергнуть цифровой обработке и определить параметры заданного сигнала. Так как данная операция (см. (4.18)) теоретически линейная то нелинейные искажения отсутствуют. В реальных смесителях, естественно, присутствуют нелинейные искажения, но эти искажения можно свести к минимуму, используя специальные микросхемы смесителей частоты (или умножителей).

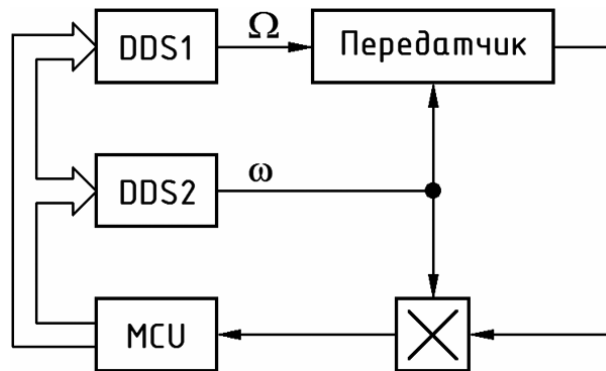


Рис.4.9. Структурная схема системы диагностики радиопередатчика с использованием синхронного детектирования сигнала (фильтры не показаны)

DDS – синтезаторы прямого цифрового синтеза; MCU – микроконтроллер.

Реализация синхронного детектирования задача довольно сложная из-за необходимости обеспечивать синхронизацию частоты гетеродина с несущей частотой сигнала.

Но если использовать один и тот же генератор, как для формирования тестового сигнала, так и в качестве гетеродина для смесителя (его роль может выполнять аналоговый умножитель) то данная проблема устраняется.

На рис.4.9 представлена упрощенная структурная схема системы диагностики, которая реализует изложенные выше принципы. В качестве генераторов тестовых сигналов используются DDS-синтезаторы (см. раздел 3.3 диссертации).

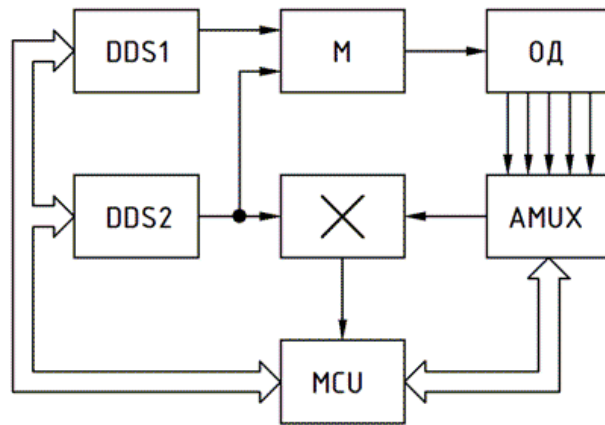


Рис.4.10. Структурная схема системы диагностики радиоприемника с использованием синхронного детектирования сигнала (фильтры не показаны)

DDS – синтезаторы прямого цифрового синтеза; М – модулятор; AMUX – аналоговый мультиплексор; ОД – объект диагностирования; MCU – микроконтроллер.

Синхронное детектирование можно применять также и при проведении технической диагностики радиоприемной части (см. рис.4.10). В данном случае DDS-синтезаторы могут использоваться для формирования амплитудно-модулированного сигнала, а также для формирования опорной частоты для смесителя. Прохождение контрольного сигнала проверяется в нескольких контрольных точках, сигналы с которых коммутируются с помощью аналогового мультиплексора и подаются на смеситель. По выделенной таким методом огибающей сигнала можно, согласно выражению (4.20), судить по амплитуде высокочастотного сигнала, его фазе и некоторым другим характеристикам.

Еще один вариант решения проблемы, – непосредственная дискретизация амплитудно-модулированного сигнала. Но тут возникает ряд трудностей, основной из которых является выбор частоты дискретизации сигнала. Пусть задан АМ сигнал вида

$$s(t) = U_o (1 + M \cos \Omega t) \cos \omega_0 t \quad (4.21)$$

Согласно теореме отсчетов частота дискретизации должна быть в два раза больше наивысшей частоты спектра сигнала, т.е. равна $2(\omega_0 + \Omega)$. Однако следует учитывать, что информация заложена не в само колебание несущей частоты, а в огибающую амплитудно-модулированного сигнала. Вследствие этого данный подход нецелесообразен [19].

Для проведения анализа представим сигнал (4.21) в аналитическом виде

$$s(t) = U_o (1 + M \cos \Omega t) e^{j\omega_0 t} \quad (4.22)$$

Тогда согласно теореме отсчетов его можно представить в виде

$$s(t) = \sum_{n=0}^N s(n\Delta t) \frac{\sin[\omega_\delta(t - n\Delta t)]}{\omega_\delta(t - n\Delta t)} = U_o \sum_{n=0}^N [1 + M \cdot \cos \Omega n\Delta t] e^{j\omega_0 n\Delta t} \frac{\sin[\omega_\delta(t - n\Delta t)]}{\omega_\delta(t - n\Delta t)} \quad (4.23)$$

Проведя некоторые преобразования с выражением (4.23), будем иметь

$$s(t) = U_o \frac{(\omega_0/\omega_\delta - 1)n\Delta t + t}{t - n\Delta t} \sum_{n=0}^N (1 + M \cos \Omega n\Delta t) \frac{\sin \omega_\delta [(\omega_0/\omega_\delta - 1)n\Delta t + t]}{\omega_\delta [(\omega_0/\omega_\delta - 1)n\Delta t + t]} \quad (4.24)$$

Произведя в (4.24) замену $\alpha = 1 - \omega_0/\omega_\delta$, можем записать

$$\frac{\sin \omega_\delta [(\omega_0/\omega_\delta - 1)n\Delta t + t]}{\omega_\delta [(\omega_0/\omega_\delta - 1)n\Delta t + t]} = \frac{\sin \omega_\delta [t - \alpha n\Delta t]}{\omega_\delta [t - \alpha n\Delta t]} \quad (4.25)$$

С учетом проведенной замены (4.25) выражение (4.24) запишется в виде

$$s(t) = U_o \frac{t - \alpha n\Delta t}{t - n\Delta t} \sum_{n=0}^N \left(1 + M \cos \Omega \frac{n}{\alpha} \alpha \Delta t \right) \frac{\sin \omega_\delta [t - \alpha n\Delta t]}{\omega_\delta [t - \alpha n\Delta t]} \quad (4.26)$$

Заменив в (4.26) интервал дискретизации $\alpha \Delta t = \Delta x$, получим

$$s(t) = U_o \frac{t - n\Delta x}{t - n\Delta t} \sum_{n=0}^N \left(1 + M \cos \Omega \frac{n}{\alpha} \Delta x \right) \frac{\sin \omega_\delta [t - n\Delta x]}{\omega_\delta [t - n\Delta x]} \quad (4.27)$$

В общем случае, когда сигнал представлен в виде $f(t) \cos \omega_0 t$, можно записать

$$s(t) = \frac{t - n\Delta x}{t - n\Delta t} \sum_{n=0}^N f\left(\frac{n}{\alpha} \Delta x\right) \frac{\sin \omega_\delta [t - n\Delta x]}{\omega_\delta [t - n\Delta x]} \quad (4.28)$$

Как видно из выражения (4.28) дискретизация амплитудно-модулированного сигнала свелась к дискретизации его огибающей, следовательно, и интервал дискретизации Δx следует выбирать, основываясь на фактической ширине спектра.

Таким образом, можно сделать вывод, что амплитудно-модулированный сигнал вполне определяется своими отсчетами, взятыми через интервал $\Delta t = 1/2f_m$, где f_m – максимальная частота модулирующего сигнала. Рассмотрим конкретный пример.

Пусть задан однотоновый амплитудно-модулированный сигнал вида

$$u = [1 + 0,85 \cdot \cos(2\pi \cdot t \cdot 1000)] \cdot \cos(2\pi \cdot t \cdot 10000)$$

Если дискретизация сигнала идет с периодом $T = 4 \cdot 10^{-6} c$, то сигнал полностью определяется своими отсчетами, это показывается на рис.4.11.

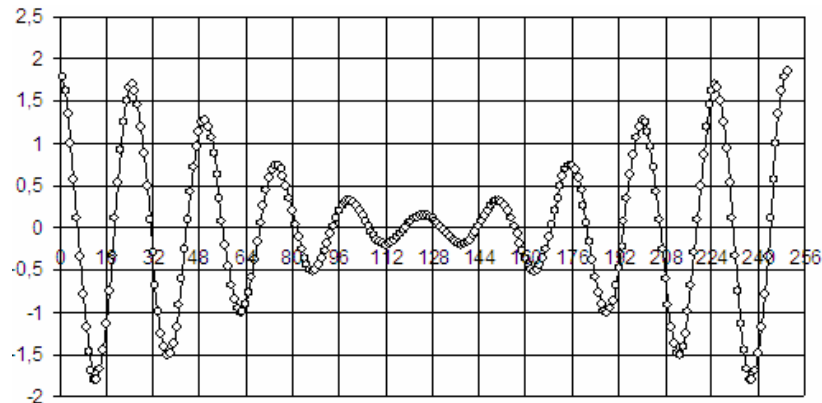


Рис.4.11. Дискретный АМ сигнал при соблюдении условий теоремы отсчетов

И соответственно может быть получен полный спектр сигнала (рис.4.12).

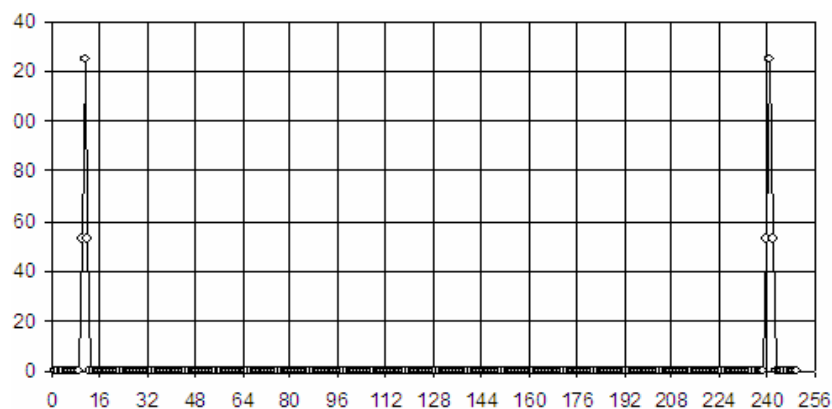


Рис.4.12. Спектр однотонового АМ сигнала при соблюдении теоремы отсчетов

В случае если увеличить несущую частоту сигнала в 100 раз при том же шаге дискретизации, то определенной будет только огибающая сигнала (см. рис.4.13)

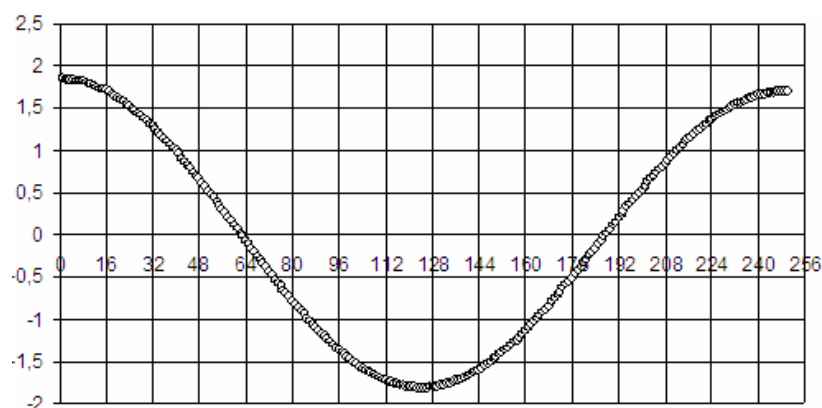


Рис.4.13. Дискретный АМ сигнал при не соблюдении теоремы отсчетов

И спектр полученного дискретного сигнала будет соответствующим (рис.4.14).

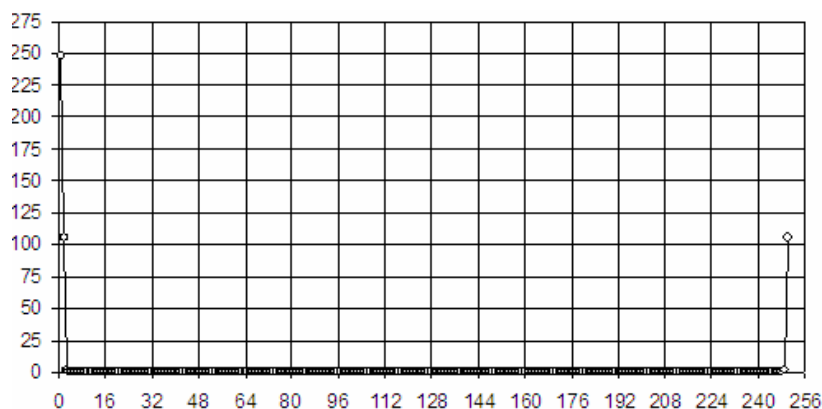


Рис.4.14. Дискретный спектр АМ сигнала при не соблюдении теоремы отсчетов

Надо отметить, что реализация данного принципа обработки высокочастотного сигнала по (4.28) довольно затруднена, так как в действительности потребуются применение быстродействующих устройств дискретизации сигналов, что не очень разумно.

Проводя анализ полученных результатов можно сделать вывод о том, что наиболее перспективно при обработке высокочастотного амплитудно-модулированного сигнала применить метод синхронного детектирования, предлагаемый в данной работе, так как он обладает одновременно и требуемой точностью и сравнительной легкостью реализации.

4.2. Определение структуры системы комплексной диагностики

Для построения системы комплексной диагностики воспользуемся результатами, полученными в предыдущих разделах диссертационной работы.

Совершенно очевидно, что система диагностики должна включать в себя микроконтроллер в качестве средства управления диагностической системой и как средство обработки диагностической информации. При выборе конкретной микросхемы можно, например, взять микроконтроллер ATmega16L, который имеет необходимую периферию.

Для генерации тестовых воздействий, и обработки ответных откликов объекта диагностирования, применим принципы, изложенные в предыдущем разделе диссертации, т.е. применим метод на основе синхронного детектирования. При этом в качестве генераторов и высокочастотного и низкочастотного сигнала лучше всего использовать DDS-синтезаторы. Для формирования высокочастотного сигнала подходит DDS-синтезатор AD9858 (или можно использовать синтезатор AD9859, однако при этом фильтрация полученного сигнала должна быть более тщательной) фирмы «Analog Devices».

В качестве генератора сигналов низкой частоты вполне можно применить DDS-синтезатор AD9850, или даже AD9835 (или AD9834) той же фирмы.

Из высокочастотных перемножителей (или смесителей) можно также применить любую подходящую по параметрам микросхему, например смеситель AD8344.

Естественно, что для обеспечения работы диагностической системы возникнет потребность в аналоговых коммутаторах и высокочастотных ключах. Можно выбрать любые подходящие по параметрам микросхемы различных фирм единственным замечанием – они должны иметь последовательный интерфейс, так как в этом случае уменьшается количество используемых портов микроконтроллера, которые могут быть использованы для решения других задач (например, обеспечивать управление DDS-синтезаторами и т.д.).

При проверке работоспособности приемника связной радиостанции (а также и при проверке передатчика) система встроенного контроля должна учитывать частоту работы радиостанции (устанавливаемую на пульте управления радиостанцией). Это необходимо не только для выбора частоты тестового сигнала, но и для проверки работоспособности некоторых функциональных узлов приемника. Такими узлами являются, например, синтезатор сетки частот или матрица электронной перестройки входных цепей приемника.

Для проверки работы матрицы электронной перестройки необходимо знать установленную рабочую частоту радиостанции. Зависимость выходного напряжения МЭП от частоты приведена в табличной форме (таблица взята из технической документации).

Частота работы радиостанции определяется кодом, формируемым пультом дистанционного управления, который поступает на синтезатор сетки частот и матрицу электронной перестройки входных цепей приемника. Так как сигнал дискретный (точнее цифровой) то в целях определения его значения можно использовать цифровой мультиплексор.

Частота, МГц	Управляющее напряжение, В	Частота, МГц	Управляющее напряжение, В
118,000	4,92	127,000	8,69
118,500	5,08	127,500	8,96
119,000	5,25	128,000	9,24
119,500	5,42	128,500	9,53
120,000	5,60	129,000	9,82
120,500	5,79	129,500	10,12
121,000	5,98	130,000	10,43
121,500	6,17	130,500	10,76
122,000	6,37	131,000	11,10
122,500	6,57	131,500	11,45
123,000	6,78	132,000	11,81
123,500	7,00	132,500	12,18
124,000	7,22	133,000	12,57
124,500	7,45	133,500	12,97
125,000	7,68	134,000	13,39
125,500	7,92	134,500	13,82
126,000	8,17	135,000	14,27
126,500	8,43	135,500	14,73

Зависимость напряжения вырабатываемого матрицей электронной перестройки от установленной частоты можно также аппроксимировать функцией

$$u_{МЭП} = 0,0031 \cdot e^{0,0625 \cdot f} \quad (4.29)$$

или провести аппроксимацию полиномом второй степени

$$u_{МЭП} = 0,01665 \cdot f^2 - 3,6649 \cdot f + 205,6251 \quad (4.30)$$

Последняя аппроксимация (4.30) имеет большую погрешность. Применение аппроксимирующей функции позволит вычислять промежуточные значения напряжений.

При этом совершенно очевидно, что диагностическая система должна автоматически определять рабочую частоту радиостанции, чтобы соответствующим образом корректировать алгоритм проведения технического диагностирования.

Для решения задач прогнозирования технического состояния и выявления неустойчивых отказов диагностическая система должна включать в себя устройство накопления информации, в качестве которого больше всего подходит микросхема flash-памяти.

В качестве такой микросхемы можно рекомендовать DataFlesh, выпускаемые фирмой «Atmel», имеющие достаточную емкость и имеющие последовательный интерфейс SPI поддерживаемый многими типами современных микроконтроллеров.

И, наконец, диагностическая система должна иметь средства индикации и управления, а также обязательным условием является наличие интерфейса связи микроконтроллера с персональным компьютером. Таким образом, обобщенная структурная схема предлагаемой системы технического диагностирования будет такой как показано на рис.4.15.

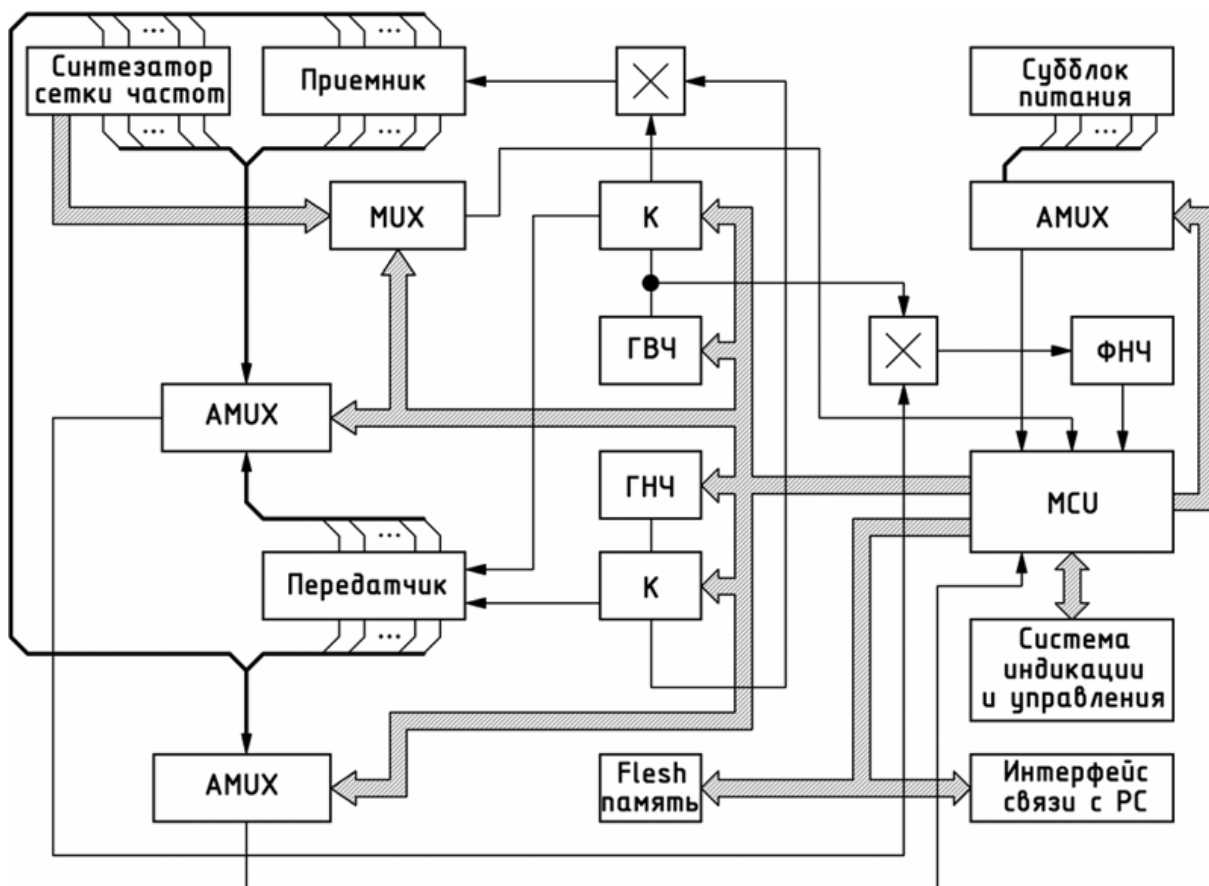


Рис.4.15. Обобщенная структурная схема разработанной диагностической системы.

AMUX – аналоговые мультиплексоры; MUX – цифровой мультиплексор;

MCU – микроконтроллер; ФНЧ – фильтр низких частот; К – высокочастотный коммутатор.

На рис.4.15 система встроенного контроля показана в составе радиостанции (приемник, передатчик, субблок питания и синтезатор сетки частот относятся к радиостанции).

Аналоговый коммутатор, мультиплексирующий сигналы с субблока питания, может и не понадобится, так как микроконтроллер может иметь многоканальный АЦП.

Проблема выбора интерфейса для связи микроконтроллера системы встроенного контроля с персональным компьютером подробно анализируется в следующем разделе.

4.3. Выбор интерфейса для связи между компьютером и микроконтроллером

Осуществление связи устройства встроенного контроля с персональным компьютером является необходимым условием для создания эффективной системы диагностики.

В настоящее время существует огромное количество самых различных интерфейсов, которые используются для осуществления связи микроконтроллера с персональным компьютером, и выбор одного конкретного из них довольно сложная задача.

Проблема выбора интерфейса для связи микроконтроллера устройства встроенного контроля с персональным компьютером приводит к необходимости определить некоторые критерии, позволяющие выбрать необходимый интерфейс из множества существующих в настоящее время интерфейсов. Так как основным назначением интерфейса связи является передача информации между устройствами, то главным критерием по выбору интерфейса для систем диагностики должна стать его устойчивость к воздействию помех.

Помехоустойчивость систем передачи дискретных сигналов [69] обычно оценивают относительным увеличением сигнала к помехе, создаваемого на выходе некоторого оптимального приемника. Величина выигрыша системы определяется выражением

$$B = \frac{P_m/N_m}{P/N} = \frac{S_m}{S} \quad (4.31)$$

где $S_m = P_m/N_m$ – отношение сигнала к шуму на выходе приемника, а $S = P/N$ – отношение сигнала к шуму на входе приемника.

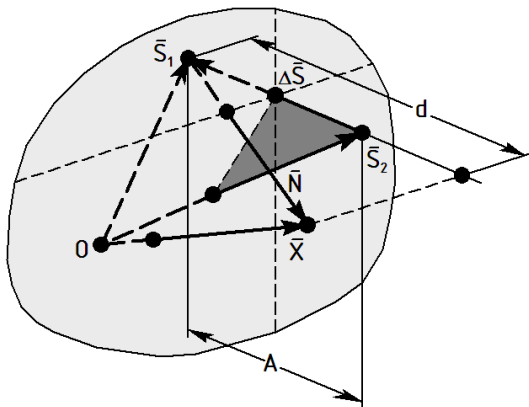


Рис.4.16. Графическая интерпретация работы оптимального приемника двоичных сигналов.

жет быть представлен в виде смеси сигнала и помехи $X(t) = F(S_k, N)$, где N – помеха, которую для простоты будем полагать аддитивной, то есть можно записать $X(t) = S_k(t) + N(t)$, ($0 \leq t \leq T$).

Далее будем считать, что помеха имеет равномерный энергетический спектр со спектральной плотностью N_0 . Будем полагать, что все $S_k(t)$ являются финитными сигналами.

лами, длительность которых – T . Пространство сигналов при этом разбивается на области так, что при попадании конца вектора \bar{X} в одну область выносятся решение, что это сигнал $S_1(t)$, а если в другую – $S_2(t)$. Задачей приемника является оптимальное разбиение пространства на некоторые области. Если сигналы равновероятны то границей областей будет гиперплоскость, проходящая через середину вектора разности сигналов $\Delta\bar{S} = \bar{S}_2 - \bar{S}_1$. При этом (см. рис.4.16) при попадании конца вектора в одну область будет воспроизводиться $S_2(t)$, а при его нахождении в другой области – сигнал $S_1(t)$.

В работе [3] показывается вывод критерия для оценки потенциальной помехоустойчивости систем передачи дискретных сигналов, при передаче сигналов различными типами модуляции. Данные критерии могут быть использованы и для оценки потенциальной помехоустойчивости различных интерфейсов связи.

Оценим потенциальную помехоустойчивость приема двоичных сигналов для различных типов интерфейсов. Критерием оптимального приема выберем выражение

$$\int_0^T X(t)[S_2(t) - S_1(t)]dt > \frac{E_2 - E_1}{2} \quad (4.32)$$

Анализируя данный критерий (4.32), получим вероятность ошибки при приеме [3]

$$p = \frac{1}{2}[1 - \Phi(\alpha)] = \frac{1}{2}[1 - \Phi(\sqrt{E_s/2N_0})], \quad (4.33)$$

где $\Phi(x)$ – функция Лапласа (в некоторых источниках ее называют функцией Крампа).

Если известна интенсивность помехи N_0 , то потенциальная помехоустойчивость, согласно (4.33), зависит только от так называемой эквивалентной энергии сигналов E_s . Вероятность ошибки имеет минимальное значение для сигналов, эквивалентная энергия которых больше. Величина эквивалентной энергии определяется выражением

$$\begin{aligned} E_s &= \int_0^T [S_2(t) - S_1(t)]^2 dt = \int_0^T [S_2^2(t) - 2S_1(t)S_2(t) + S_1^2(t)]dt = \\ &= E_2 + E_1 - 2\int_0^T S_1(t)S_2(t)dt = 2E_2 + 2E_1 - 2\int_0^T [S_2(t) + S_1(t)]^2 dt \end{aligned} \quad (4.34)$$

Если система с активной паузой и $E_1 = E_2 = E$ (энергии сигналов равны), то в этом случае $E_s = 4E$. Вероятность ошибки приема при этом определится выражением

$$p = 0,5 \cdot [1 - \Phi(\sqrt{2} \cdot \sqrt{E/N_0})] \quad (4.35)$$

Наибольшей помехоустойчивостью, согласно (4.33) и (4.34), обладает система с противоположными сигналами – двухполярные импульсы, сигналы с фазовым сдвигом

180° и т.д. Именно с такими сигналами мы сталкиваемся при работе с интерфейсами RS-232, USB, Fire-Wire и некоторыми другими последовательными интерфейсами.

Кроме того, для передачи цифровых данных на значительное расстояние часто применяют дискретную фазовую (PSK) или частотную (FSK) модуляцию [3]. Потенциальная помехоустойчивость сигналов передаваемых PSK модуляцией (со сдвигом фаз 180°) определяется выражением (4.35). В современных системах передачи цифровых сигналов помимо обычной PSK модуляции широко используют DPSK модуляцию (относительную фазовую модуляцию), вероятность ошибки для которой составляет

$$p_{DPSK} \approx 2p_{PSK} = 1 - \Phi(\sqrt{2} \cdot \sqrt{E/N_0}) \quad (4.36)$$

Несмотря на устранение неприятного явления называемого «обратной работой», вероятность ошибки при переходе от PSK к DPSK модуляции возрастает вдвое.

Для систем с ортогональными сигналами, к которым можно отнести сигналы с дискретной частотной модуляцией (FSK – frequency shift keying) или сигналы с PSK модуляцией со сдвигом фаз 90° (квадратурная модуляция) согласно (4.34) максимальная эквивалентная энергия составляет $E_s = 2E$. Тогда вероятность ошибочного приема

$$p_{FSK} = 0,5 \cdot \left[1 - \Phi(\sqrt{E/N_0}) \right] \quad (4.37)$$

Для систем с пассивной паузой, например, с такими сигналами мы встречаемся при приеме сигналов по интерфейсам Centronics (LPT), SPI, I²C и некоторым другим, вероятность ошибки также можно определить согласно (4.33) и (4.34). В этом случае эквивалентная энергия составит $E_s = E$, тогда вероятность ошибочного приема будет

$$p = 0,5 \cdot \left[1 - \Phi(\sqrt{E/N_0} / \sqrt{2}) \right] \quad (4.38)$$

Причем надо отметить тот факт, что при приеме сигналов через порт LPT, являющимся восьмипроводным параллельным интерфейсом, вероятность ошибки может увеличиться в восемь раз, так как помехам подвержен каждый из восьми проводников.

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод об оптимальном выборе интерфейса связи по критерию максимальной потенциальной помехоустойчивости. Наиболее помехоустойчивыми являются интерфейсы RS-232, Fire-Wire и USB, сигналы которых представляют собой двухполярные импульсы. Первый интерфейс (RS-232C) реализован на компьютере в портах COM и LPT (в порту LPT он используется реже, хотя он там и есть), и если говорить точнее, то используется интерфейс RS-232C. Интерфейс Fire-Wire используется довольно редко, в основном в случаях, когда требуется большая скорость передачи данных. Для реализации интерфейса USB, очень популярного в последнее время, у персонального компьютера имеется специальный порт с аналогичным названием.

В случае необходимости передачи данных на относительно большие расстояния может потребоваться дополнительная модуляция сигнала, и в этом случае лучше всего подходят PSK и DPSK модуляции. Если главным требованием является помехоустойчивость передачи данных то лучше использовать PSK модуляцию (см. (4.35)), а если помимо помехоустойчивости требуется простота реализации, то лучше всего применить DPSK модуляцию, хотя это согласно (4.36) снизит помехоустойчивость передачи данных.

Осуществление связи устройства встроенного контроля с персональным компьютером является необходимым условием для создания эффективной системы диагностики.

У каждого интерфейса есть свои достоинства и недостатки при одной и той же потенциальной помехоустойчивости. Поэтому при выборе интерфейса следует также учитывать другие факторы, например их распространенность, наличие возможности реализации данного интерфейса на конкретном компьютере. Обычный персональный компьютер, как правило, имеет внешние порты LPT, COM и USB, поэтому выбирать следует один из них.

LPT порт включает в себя два интерфейса – интерфейс RS-232 и восьмиразрядный параллельный интерфейс (Centronics). Однако как уже выше отмечалось последовательный интерфейс в данном порту используют редко. Кроме того, как правило, персональный компьютер имеет только один LPT порт, и он уже может быть занятым, например, к нему подключен принтер. Использовать параллельный интерфейс неактуально, так как он обладает сравнительно низкой помехоустойчивостью.

Следовательно, необходимо выбирать между портами USB и COM (см. рис.4.17).



Рис.4.17. Разъемы USB и COM портов.

Оба порта обладают высокой потенциальной помехоустойчивостью, поэтому выбор следует проводить исходя из других критериев. Скорость передачи данных через порт USB значительно выше, чем через COM порт, однако и он имеет свои недостатки.

Например, реализация интерфейса USB с точки зрения программирования задача довольно трудная и посильная только профессиональным программистам, так как работа с этим портом требует написания собственного драйвера [7]. Обмен данными через COM-порт компьютера реализовать гораздо легче, и поэтому остановим выбор именно на нем.

Еще одним преимуществом COM порта компьютера является его высокая нагрузочная способность (особенно по сравнению с параллельным LPT портом).

4.4. Элементы принципиальной схемы

При построении принципиальной схемы системы комплексной диагностики возможно применение самых различных микросхем и соответственно система будет выглядеть несколько иначе. Принципиальная схема диагностической системы может существенно упроститься в случае применения в ее составе многофункциональных микросхем, содержащих в своем составе несколько устройств. Например, микросхема синтезатора частоты с прямым цифровым синтезом AD9858 имеет в своем составе несколько устройств [61]. Помимо самого DDS-синтезатора в ней имеется аналоговый перемножитель и фазовый детектор, что позволяет избежать применения дополнительных микросхем.

Особенностью предлагаемой диагностической системы является применение преимущественно цифровых и цифроаналоговых микросхем, представляющих собой уже функционально законченные изделия, требующих минимум дополнительных внешних элементов, что существенно упрощает построение принципиальной схемы. Внешние элементы¹ (а также их номиналы) подключаемые к микросхемам по большей части заранее определены в документации на данную микросхему, предоставляемую производителем. Расчетные формулы для элементов, номиналы которых необходимо определять в каждом конкретном случае также обычно приводятся в документации производителя.

Применение микроконтроллеров и цифроаналоговых микросхем обладает еще и тем преимуществом, что фактически создание схемы во многом сводится к программированию микроконтроллера, который будет осуществлять управление работой всей системы. Таким образом, ядром предлагаемой диагностической системы является микроконтроллер, от выбора которого во многом зависит и принципиальная схема.

Выбор микроконтроллера для управления системой и необходимых вычислительных операций довольно многогранная задача. Определение конкретного типа микроконтроллера обусловлено многими факторами. В том числе и внешними условиями работы, микроконтроллер должен работать в промышленном диапазоне температур², что соответствует условиям эксплуатации диагностируемого оборудования. Немаловажную роль играет величина напряжения питания, так как практически все основные устройства (DDS-синтезаторы, flash-память), входящие в состав предлагаемой диагностической системы, имеют напряжение питания 3,3В, и рассчитаны на работу с соответствующими входными сигналами. Для обеспечения согласования уровней сигналов целесообразно применить микроконтроллер, имеющий аналогичные уровни входных и выходных сигналов.

¹ Например, резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и прочие элементы.

² Промышленный диапазон температур составляет от -40 до +85°C.

Кроме того, необходимо наличие у микроконтроллера определенной периферии для взаимодействия с внешними устройствами. Сюда следует отнести интерфейсы SPI, I²C [47] (или аналогичный ему интерфейс TWI – Two Wire Interface), универсальные синхронно-асинхронные приемопередатчики USART (необходимые при реализации интерфейса RS-232 для связи микроконтроллера с персональным компьютером), встроенный многоканальный АЦП, а также обычные восьмиразрядные параллельные порты.

В результате проведенного анализа существующих в настоящее время микроконтроллеров для реализации системы был выбран микроконтроллер ATmega16L-8PI¹, производства фирмы «Atmel». Напряжение питания микроконтроллера ATmega16L составляет (2,7...5,5)В, что вполне удовлетворяет поставленным требованиям. Микроконтроллер имеет всю необходимую периферию, обладает высоким быстродействием [64].

Напряжение питания микроконтроллера выберем равным 3,3В для обеспечения согласования с остальными микросхемами. Тактовую частоту микроконтроллера выберем равной 8МГц (это типовое значение, указанное в документации фирмы-производителя).

Для рассмотрения всех нюансов возникающих при построении принципиальной схемы предлагаемой диагностической системы объем данной диссертации увеличится до недопустимых пределов, вследствие чего детальное рассмотрение построения общей принципиальной схемы становится невозможным. Однако рассмотрим только принципиальные схемы сопряжения микроконтроллера с основными составными частями системы.

Основными частями предлагаемой системы технической диагностики в соответствии с предлагаемыми в настоящей работе принципами являются части включающие в себя интерфейс связи с персональным компьютером, DDS-синтезаторы и flash-память. Кроме того, возникает необходимость рассмотрения особенностей использования встроенного АЦП микроконтроллера, а также включения самого микроконтроллера, так как они также являются определяющими элементами в данной диссертационной работе (обработка диагностических сигналов практически полностью осуществляется в цифровом виде).

Для этого в данной работе ниже выделено три отдельных раздела для рассмотрения принципиальных схем сопряжения микроконтроллера с основными устройствами, соответственно с персональным компьютером, flash-памятью и DDS-синтезатором. При рассмотрении сопряжения flash-памяти с микроконтроллером рассматривается также особенности использования встроенного АЦП микроконтроллера, расчет соответствующих элементов принципиальной схемы и особенности выбора параметров преобразования.

¹ Данный микроконтроллер имеет 40-выводный PDIP корпус.

4.4.1. Сопряжение микроконтроллера с персональным компьютером

Для реализации обмена данными между микроконтроллером и персональным компьютером на основании анализа существующих интерфейсов (см. раздел 4.3 диссертации) был выбран интерфейс RS-232 [32]. Формат сигнала RS-232 представлен на рис.4.18.

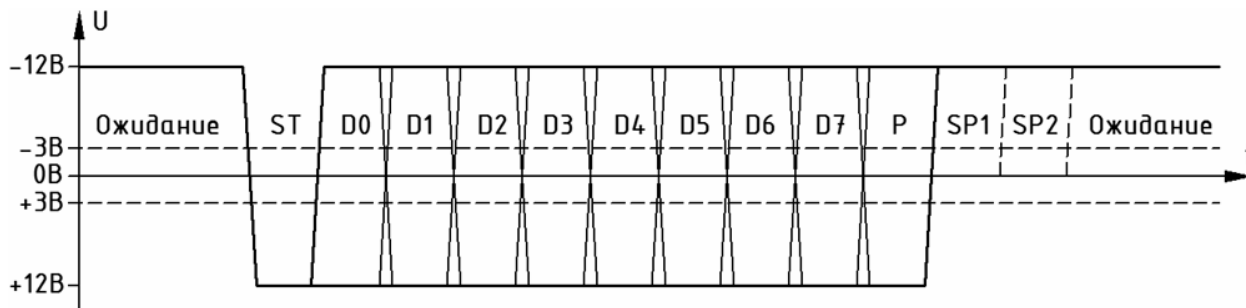


Рис.4.18. Сигнал на линии интерфейса RS-232С.

Как видно из рисунка амплитудное значение сигнала составляет 12В, и к тому же сам сигнал двухполярный, а микроконтроллеры работают с сигналами, которые представляют собой последовательность однополярных импульсов, амплитудой в $(5 \div 3)$ В.

Вследствие этого возникает необходимость применения преобразователей уровня типа MAX232 (см. рис.4.19.), выпускаемого фирмой «Maxim», или аналогичных ему, например можно использовать микросхему ADM101E фирмы «Analog Devices» и т.д.



Рис.4.19. Преобразователь уровней MAX232CPE

Выбор микросхемы преобразователя уровней, которые имеют практически одинаковые характеристики можно осуществить исходя из требуемого количества линий передачи информации, величины питающего напряжения (следует учитывать диапазоны входных и выходных напряжений). Кроме того, если проектируемое устройство критично к размерам микросхем и типу корпуса, то следует учитывать и этот критерий.

Преобразователи уровней выпускают многие фирмы, наиболее часто применяют преобразователи уровней фирмы «Maxim», однако в данном случае лучше применить микросхему ADM101E «Analog Devices». Данный выбор основан на анализе продукции выпускаемой разными фирмами: «Maxim», «Microchip», «Analog Devices» и ряда других.

Микросхема ADM101E в отличие от других аналогичных по назначению микросхем имеет только один канал передачи данных, CMOS-совместимые уровни напряжений (допускает питающее напряжение в 3,3В), и имеет малые габариты [63].

Рассмотрим конкретную реализацию сопряжения микроконтроллера ATmega16L с персональным компьютером. Сначала рассмотрим включение самого микроконтроллера.

Работа микроконтроллера начинается с его сброса, при этом имеется несколько источников сброса. Микроконтроллер сам сбрасывается при включении питания или, если напряжение питания опускается ниже порогового напряжения $V_{POT}=1,4В$. Для большей надежности можно применить внешний сброс.

Расчет цепи внешнего сброса микроконтроллера представляющую собой интегральную цепочку сводится к расчету элементов этой цепи таким образом, чтобы после включения питания на выводе RESET удерживался низкий уровень сигнала (типичное значение до $0,5V_{CC}$ относительно земли) в течение не менее $1,5\mu\text{с}$ (см. рис.4.20.).

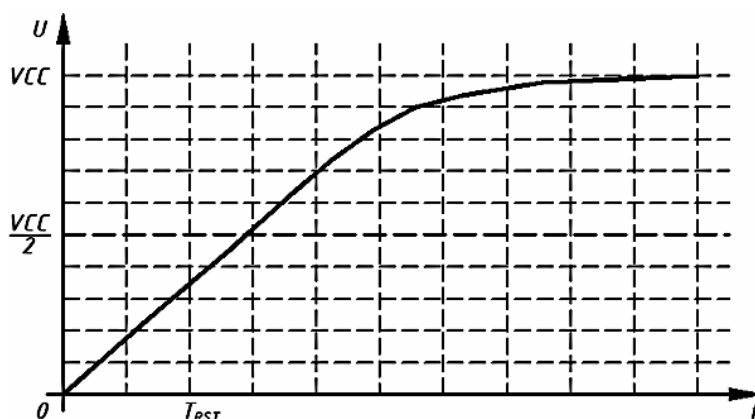


Рис.4.20. Изменение напряжения на входе RESET при подаче питания.

Выбор источника сброса осуществляется установкой соответствующих битов в регистре статуса MCU (MCUCSR). А именно установкой битов EXTRF и PORF. Бит EXTRF разрешает внешний сброс, и при сбросе по подаче питания должен быть сброшен в ноль.

Рассчитаем цепь внешнего сброса для микроконтроллера. К выводу RESET согласно документации производителя может подключаться подтягивающий резистор номиналом $30\text{к}\Omega$. Время удерживания низкого уровня выберем для надежной работы в 20 раз выше минимального значения, то есть $t_{RST} = 30\mu\text{с}$.

Постоянная времени RC-цепочки определяется выражением

$$\tau = RC = t_{RST} \Rightarrow C = t_{RST} / R \quad (4.39)$$

Подставляя в полученную формулу значения получим

$$C = 30 \cdot 10^{-6} / 30 \cdot 10^3 = 1\text{нФ}$$

При выбранной выше величине тактовой частоты 8МГц согласно документации производителя между входами для подключения кварцевого резонатора и землей необходимо включить конденсаторы емкостью 22пФ .

После того как был произведен выбор элементов принципиальной схемы подключения микроконтроллера, можно рассмотреть включение преобразователя уровней.

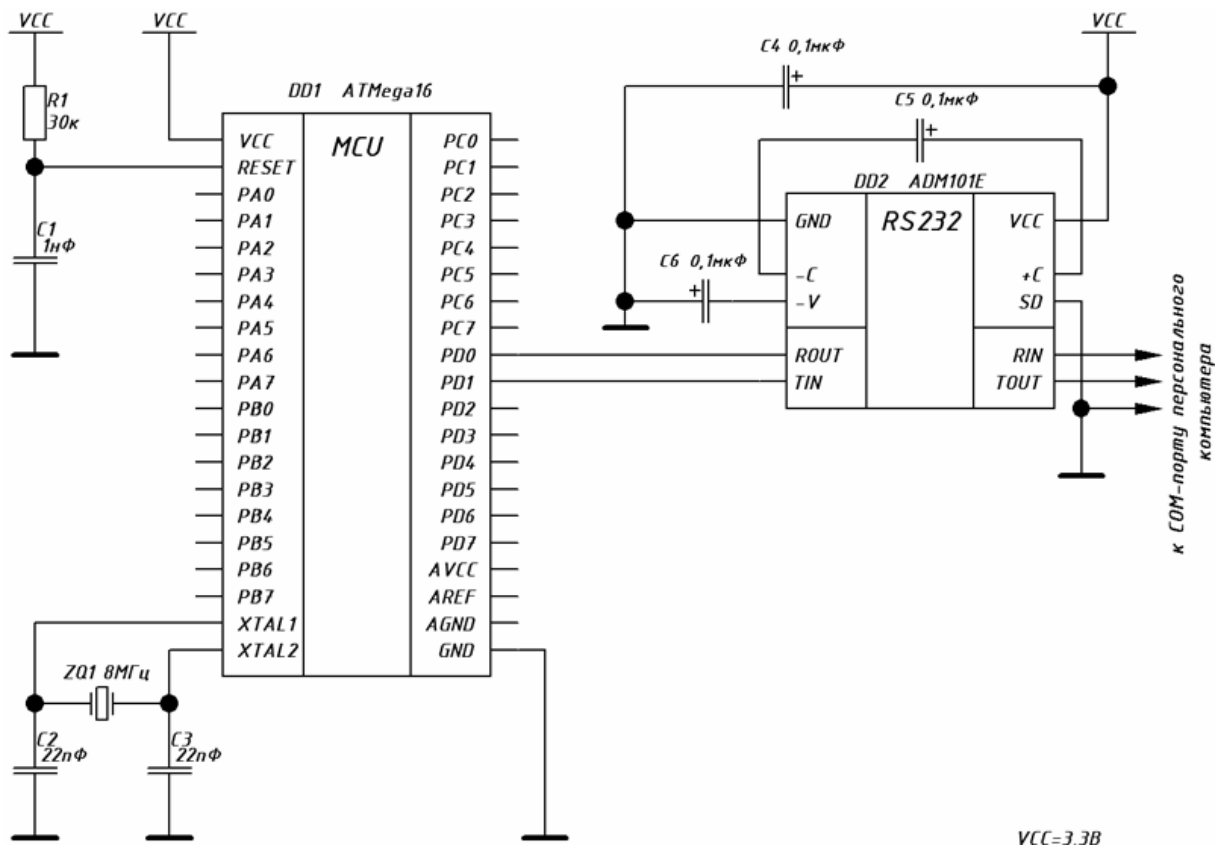


Рис.4.21. Принципиальная схема сопряжения микроконтроллера с персональным компьютером.

Собственно схема включения уже определена в документации производителя. Для обеспечения работы микросхемы необходимо включение конденсаторов емкостью в 0,1мкФ между определенными входами микросхемы (см. рис.4.21.). Остается только соединить сигнальные выходы микросхемы с соответствующим портом микроконтроллера. Для защиты цепей компьютера от повреждений (или наоборот, защиты цепей устройства встроенного контроля) можно также применить оптоэлектронные развязки.

USART микроконтроллера подключен к порту D. Вывод PD1 (TXD) является выходом приемопередатчика, а вывод PD0 (RXD) входом.

Скорость обмена данными устанавливается в регистре UBRR, и в асинхронном режиме скорость работы приемопередатчика USART определяется выражением

$$V_{USART} = \frac{f_{CLK}}{16(UBRR + 1)} \quad (4.40)$$

где f_{CLK} – тактовая частота микроконтроллера; $UBRR$ – число, записанное в регистр.

Передача данных инициализируется записью передаваемых данных в регистр данных USART (UDR). За управление USART отвечают регистры контроля и статуса UCSR (их три). О завершении приема (передачи) или возникновение ошибки можно узнать, проверяя соответствующие биты регистров UCSR. Принятые по линии данные помещаются в регистр данных UDR (регистр выполняет роль как приемного, так и передающего буфера).

Подпрограммы работы с USART микроконтроллера приведены в Приложении 3.

4.4.2. Сопряжение микроконтроллера с flash-памятью

Сопряжение микроконтроллера с flash-памятью является необходимым условием при построении системы комплексной диагностики позволяющей реализовать изложенные выше принципы. Для расширения возможностей системы flash-память можно сделать съемной, что позволит проводить диагностику радиоэлектронного оборудования без подключения его непосредственно к персональному компьютеру.

То есть устройство диагностики собирает необходимые данные и сохраняет их во flash-память, которая затем снимается и подключается к компьютеру отдельно.

Для реализации обмена данными между flash-памятью и микроконтроллером применяется последовательный интерфейс SPI. Его имеют практически все микроконтроллеры серии AVR. Он обеспечивает высокоскоростную синхронную передачу данных между микроконтроллером и внешними устройствами или другим микроконтроллером. Кроме того, SPI интерфейс используется при внутрисхемном программировании (ISP).

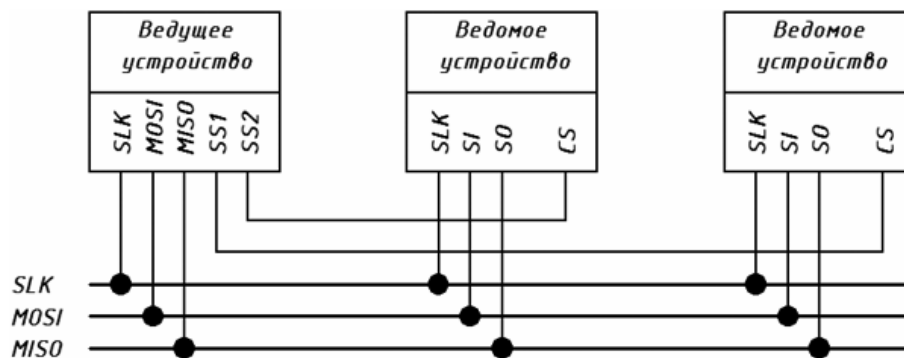


Рис.4.22. Организация интерфейса SPI.

Простые внешние устройства, например различные датчики или память могут работать, как правило, только в режиме ведомого устройства, а микроконтроллер AVR может работать как в режиме ведущего, так и в режиме ведомого устройства.

Интерфейс SPI является четырехпроводным интерфейсом, точнее три линии являются основными, а общее количество линий может меняться в зависимости от количества устройств подключенных к ведомому устройству и при одном устройстве их четыре (см. рис.4.22.). Приняты следующие обозначения для соответствующих выводов микросхем: MOSI (Master Output Slave Input), MISO (Master Input Slave Output)¹, CLK (Clock), SS (Slave Select)². Ведущее устройство вырабатывает тактовый сигнал CLK, который обеспечивает синхронную работу ведущего и ведомого устройства.

К ведущему устройству как уже отмечалось, может подключаться несколько ведомых устройств (нужное устройство выбирается подачей на него сигнала CS).

¹ У ведомых устройств эти выводы называются просто SI (Slave Input) и SO (Slave Output) соответственно.

² Или у ведомых устройств этот вход, как правило, называется CS (Chip Select).

Тактовая частота АЦП должна находиться в диапазоне

$$f_{ADCF} = (50 \dots 1000) \text{кГц}$$

Значение тактовой частоты АЦП устанавливается в регистре управления и статуса АЦП (ADCSRA) изменением состоянием битов ADPS2, ADPS1 и ADPS0. Типовое значение составляет 200кГц. Выберем тактовую частоту величиной 250кГц.

Коэффициент деления определяется выражением

$$K_{ADP} = \frac{f_{CLK}}{f_{ADCF}} = \frac{8000}{250} = 32 \quad (4.41)$$

Данный коэффициент устанавливается, если ADPS2=1, ADPS1=0 и ADPS0=1.

Для обеспечения работы АЦП необходимо определить опорное напряжение. Опорное напряжение подается на вход AREF, а при присоединении входа AREF к AVCC используется внутренний источник опорного напряжения, типовая величина составляет

$$V_{INT} = 2,56 \text{В}$$

При использовании внешнего источника опорного напряжения необходимо учитывать, что сопротивление входа для подачи опорного напряжения

$$R_{REF} = 32 \text{кОм}$$

и величина опорного напряжения может находиться в диапазоне

$$V_{REF} = (2,0 \dots V_{CC}) \text{В}$$

Сопротивление сигнальных входов АЦП очень высокое

$$R_{IN} = 100 \text{МОм}$$

Частота входного сигнала в обычном (не дифференциальном) режиме

$$f_{INmax} = 38,5 \text{кГц}$$

Динамический диапазон входного сигнала лежит в пределах от V_{GND} до V_{REF} .

После того, как преобразование будет завершено (выставлен флаг ADIF в регистре ADCSRA), результат преобразования помещается в регистры ADC (ADCL, ADCH).

Результат преобразования определяется выражением

$$D_{ADC} = \frac{V_{IN}}{V_{REF}} \cdot 1024 \quad (4.42)$$

Вернемся к рассмотрению особенностей предлагаемой принципиальной схемы. Для предварительного усиления сигнала и выполнения буферных функций на входе АЦП был включен предварительный усилитель на операционном усилителе¹. Микросхема

¹ Для достижения лучших результатов можно использовать операционный усилитель TL085ACN, имеющий входное сопротивление 1ГОм, напряжение питания остается таким же (подается на выводы 11 и 7).

LM324 представляет собой счетверенный операционный усилитель (на схеме показан только один из них). Питание подается на выводы 11 (VCC) и 4 (GND) микросхемы.

Резисторы R5 и R6 обеспечивают смещение 1,65В на не инвертирующем входе, так как операционный усилитель работает с одним источником питания [44]. Величина резисторов выбрана 10кОм (рекомендуемые значения лежат в пределах 9...20кОм).

Резисторы R3 и R4 определяют коэффициент усиления каскада

$$K_u = -R3/R4 \quad (4.43)$$

знак минус означает, что усилитель инвертирующий.

Коэффициент усиления каскада выбран равным десяти, что вполне достаточно.

Источник опорного напряжения выбран внутренний (2,56В). Для этого вывод AREF соединен с выводом AVCC микроконтроллера. Питание аналоговых цепей осуществляется через фильтр нижних частот R2C4, параметры которого определены документацией производителя ($R2 = 100\text{Ом}$; $C4 = 100\text{нФ}$). Расчет цепи сброса микроконтроллера и выбор конденсаторов C2 и C3 производился в предыдущем разделе.

Рассмотрим, алгоритм записи и чтения flash-памяти [65]. Временные диаграммы, поясняющие принцип обмена информацией с flash-памятью приводятся на рис.4.24.

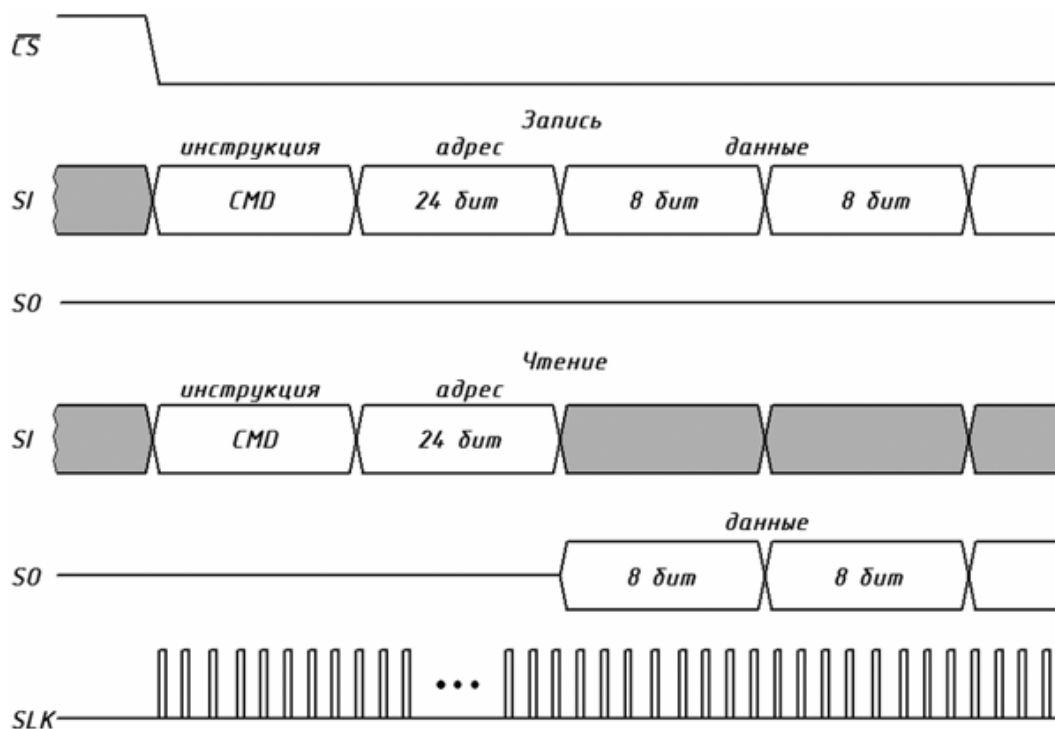


Рис.4.24. Диаграммы, поясняющие операции записи и чтения flash-памяти.

Операция записи (чтения) начинается с байта инструкции, которая определяет, что именно требуется сделать, затем следует 3 байта адреса, после чего могут идти байты данных (или приниматься байты данных с линии SO). При этом микросхема должна быть выбрана сигналом CS. Операция чтения (или записи) начинается с первым тактовым импульсом SLK от микроконтроллера. Программы работы с SPI приведены в Приложении 4.

4.4.3. Управление работой DDS-синтезатора

Рассмотрим реализацию сопряжения микроконтроллера ATmega16L с DDS-синтезатором AD9850, выполняющего функцию генератора низкочастотных сигналов.

Управление работой DDS-синтезатора с точки зрения программирования не представляет никаких сложностей [60]. Принципиальная схема включения DDS-синтезатора и сопряжения его с микроконтроллером показана на рис.4.25.

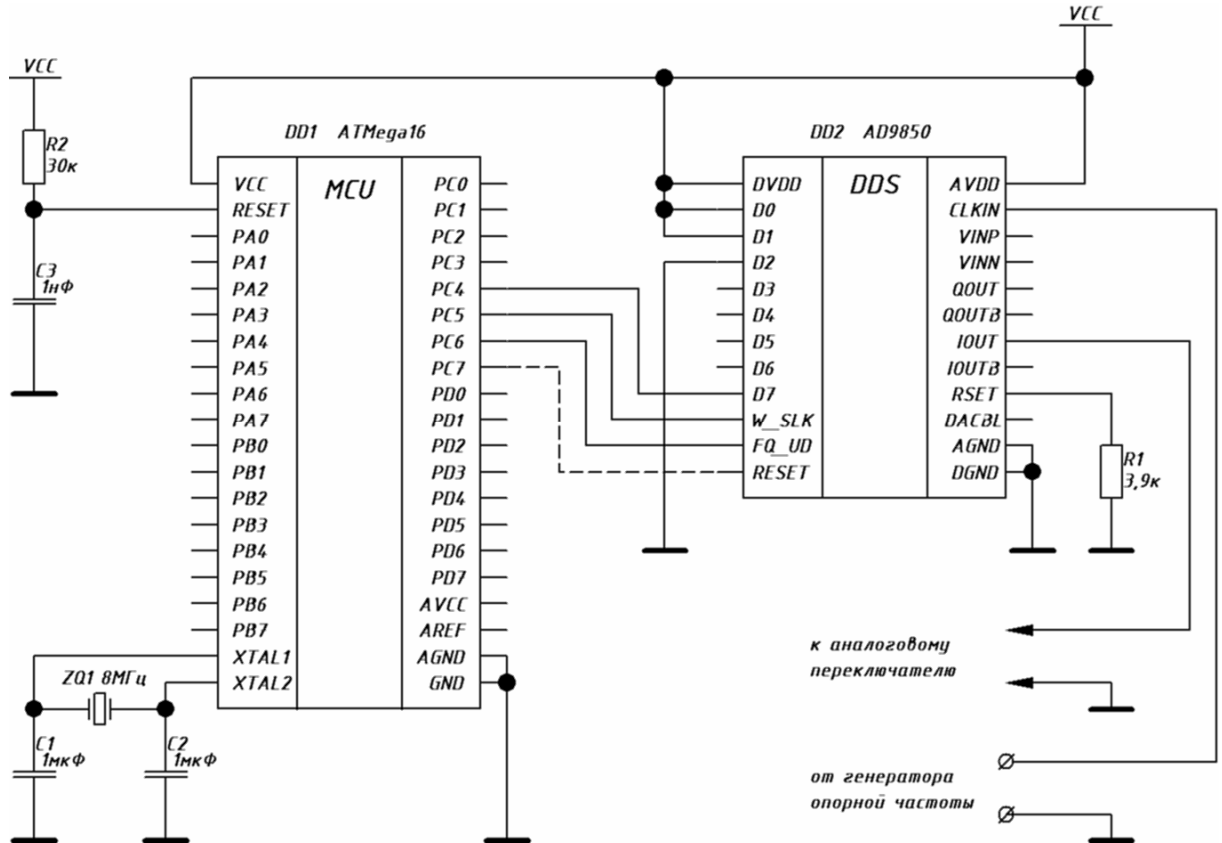


Рис.4.25. Схема включения DDS-синтезатора.

Управление синтезатором можно управлять либо через параллельный восьмиразрядный интерфейс либо через последовательный интерфейс. В целях экономии линий порта микроконтроллера для управления синтезатором используется последовательный интерфейс, обеспечивающий синхронную передачу данных.

Для включения DDS-синтезатора в режиме последовательного ввода управляющих данных выходы D1 и D0 следует подключить к источнику питания, а вывод D2 на землю. Вывод D7 в этом случае служит последовательным входом.

Резистор R1 (R_{SET}) определяет величину выходного тока цифроаналогового преобразователя DDS-синтезатора, и определяется из соотношения

$$I_{out} = 32(1,248V/R_{SET}) \quad (4.44)$$

В обычном режиме работы (который рекомендуется производителем данной микросхемы) I_{out} составляет 10мА. При этом из (4.44) величина резистора составит 3,9кОм

Для управления работой DDS-синтезатора были выбраны биты PC4...PC7 порта C. Формат слова управления представлен на рис.4.26. Первыми идут 32 бита слова установки частоты, затем два управляющих бита, бит режима энергосбережения, 5-битное слово управления фазой. Каждый бит тактируется сигналом W_CLK. после передачи всех данных новые параметры устанавливаются подачей сигнала FQ_UD.

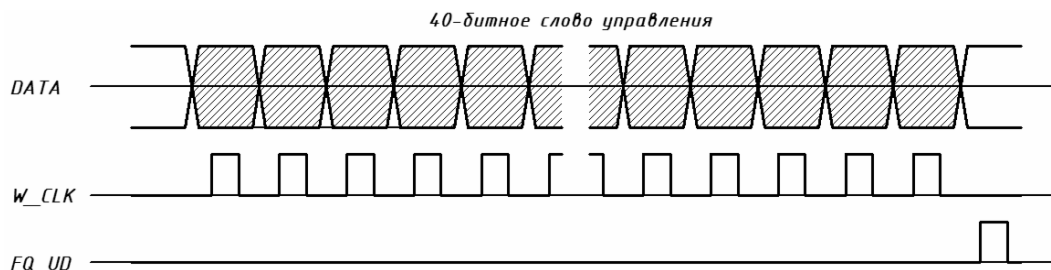


Рис.4.26. Формат посылки управляющих данных.

Для синхронизации фазы сигналов DDS-синтезаторов (при использовании нескольких синтезаторов) используется вывод RESET синтезатора.

Опорная частота синтезатора должна быть, по крайней мере, в два раза больше частоты вырабатываемого сигнала (согласно теореме Котельникова). Если синтезатор используется для выработки сигналов звуковых частот (20...20000Гц) то опорная частота должна быть не менее 40кГц. Однако опорную частоту выберем величиной 20МГц.

Выбор такой частоты основан на том, что один и тот же генератор будет использоваться для тактирования, как генератора низкочастотных сигналов, в качестве которого выбрана микросхема AD9850, так и генератора высокочастотного сигнала, роль которого выполняет DDS-синтезатор AD9859 [62], имеющий встроенный умножитель тактовой частоты. Коэффициент умножения может быть 4 или 20. Таким образом, при генераторе тактовой частоты величиной 20МГц и коэффициенте умножения 20 внутренняя опорная частота высокочастотного синтезатора составит $20 \cdot 20\text{МГц} = 400\text{МГц}$, что удовлетворяет условиям выработки выходного сигнала синтезатора в 136МГц (три отсчета на период).

При конструировании печатной платы устройства встроенного контроля необходимо учитывать, что часть схемы с высокочастотными сигналами должна быть хорошо экранирована для устранения влияния на остальные элементы и на объект диагностирования. В противном случае высокочастотные наводки могут помешать проведению точных измерений или изменить работу объекта диагностирования, что, в конечном счете, приведет к снижению эффективности системы в целом. Аппаратные средства технического диагностирования обеспечивают в основном сбор данных для проведения диагностики, и точность полученных данных зависит в основном от них. Второй составляющей диагностического комплекса является программная среда (в которой производится анализ и интерпретация полученных данных) рассмотрению которой посвящена следующая глава.

Глава 5. Программный диагностический комплекс

Для проведения комплексной диагностики радиоэлектронного оборудования устройства встроенного контроля может оказаться недостаточно для проведения всех необходимых операций технического диагностирования. В этом случае для проведения расширенной диагностики технического состояния может быть использован персональный компьютер с установленным на нем специально разработанным программным обеспечением [16]. При этом следует особенно отметить актуальность применения для диагностических целей экспертных систем [51] (это уже отмечалось ранее в Главе 3).

Имеется также возможность использования таких многофункциональных программных пакетов как MatLab, Lab View и других аналогичных им.

Использование таких систем как MatLab представляется очень перспективным [5], однако им свойственен также и ряд недостатков присущих готовым программным пакетам. Они часто не учитывают особенностей диагностируемого оборудования и аппаратных устройств, с которыми они будут взаимодействовать. В результате создание системы диагностики на базе таких готовых пакетов по трудоемкости может приблизиться к трудоемкости разработки собственного программного обеспечения.

Кроме того, как правило, готовые программные пакеты имеют множество дополнительных функций не нужных при проведении диагностики конкретного оборудования, которые будут сбивать с толку обслуживающий персонал не знакомый с данной системой. Многофункциональность программного обеспечения не всегда может быть полезна.

Необходимо отметить, что некоторые программные пакеты позволяют создавать автономные программные модули, которые могут функционировать отдельно от основной программы, используя только ее динамические библиотеки или иные компоненты.

В частности такой возможностью обладает известная система MatLab [28]. Кроме того, данная программа имеет множество встроенных готовых функций очень удобных для проведения диагностики радиоэлектронного оборудования [26].

Например, функции Signal Processing Toolbox позволяют произвести всесторонний анализ самых различных сигналов. Причем возможно использование самых различных видов анализа [29], с использованием разных методов обработки данных.

Как уже отмечалось выше, излишняя многофункциональность программы создает определенные трудности при ее эксплуатации, вследствие чего следует поставить вопрос о создании собственного диагностического программного обеспечения, принципы построения которого подробно рассматриваются в следующих разделах диссертации.

5.1. Принципы организации диагностической программы

При создании собственного диагностического программного обеспечения возникает ряд вопросов различного характера требующих решения, а именно:

- что должна выполнять диагностическая программа?
- из каких модулей должно состоять программное обеспечение?
- какие методы обработки диагностических параметров будут использоваться?
- каким должен быть графический интерфейс программы?
- каким образом программа будет взаимодействовать с аппаратными средствами технического диагностирования (выбор интерфейса связи с аппаратными средствами, включая саму реализацию интерфейса и установление формата обмена данными)?

Кроме перечисленных вопросов имеются и ряд других проблем [10].

Прежде всего, необходимо определить задачи, решаемые диагностической программой, в первую очередь это определение текущего технического состояния, поиск места отказа и прогнозирование технического состояния на последующий период времени.

Таким образом, очевидно, что программный комплекс должен включать в себя модуль определения текущего технического состояния, модуль поиска места отказа, модуль прогнозирования технического состояния. При этом возникает вопрос получения и хранения диагностических данных. Для хранения данных лучше всего применить базы данных.

Причем баз данных может быть несколько, например база данных, в которой находятся сведения о номинальных значениях диагностических параметров (и допусков на них) и база данных о техническом состоянии за предыдущие временные периоды.

Потребность базы данных о техническом состоянии за предыдущие моменты времени возникает из-за необходимости подобной информации для прогнозирования технического состояния и для создания гибких алгоритмов диагностирования.

Необходимость получения текущих диагностических параметров требует наличия модуля получения информации от аппаратных средств диагностирования [50, 23].

Чтобы обеспечить правильное функционирование всех модулей, а также для организации пользовательского интерфейса, диагностический программный комплекс должен включать также модуль управления. Кроме того, в диагностической системе желательно наличие мощной и разветвленной справочной системы.

То есть программный комплекс примет вид, показанный на рис.5.1. На рисунке не показаны связи модуля управления с базами данных, потому как предполагается, что для редактирования баз данных будет использоваться специально предназначенная для этого программа, вызываемая при необходимости из основной программы.

Редактор баз данных может быть включен и в состав основного диагностического программного комплекса, и в этом случае программный комплекс даже получает некоторые дополнительные преимущества, например при обнаруженной неисправности неизвестного типа программа может сама предлагать внести корректировки в базу данных.

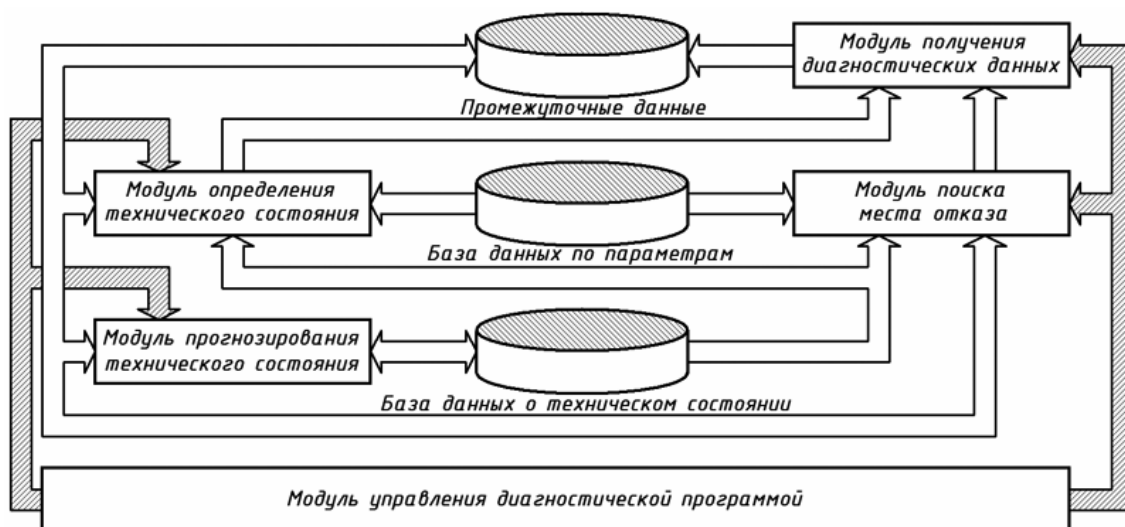


Рис.5.1. Структура программного комплекса.

Некоторые модули программы могут быть объединены в один. Например, модуль определения технического состояния может быть объединен с модулем поиска места отказа, так как принципы работы и даже алгоритмы функционирования данных модулей весьма схожи между собой. И, кроме того, поиск отказа очень часто проводится одновременно с определением текущего технического состояния.

Важной проблемой при создании диагностической программы является создание пользовательского интерфейса [21], который должен одновременно быть и простым и многофункциональным. Удобство и простота в работе уменьшают возможные ошибки оператора, то есть сводят к минимуму воздействие человеческого фактора.

В данной диссертационной работе предлагается использовать одновременной и графический и текстовый вывод результатов технического диагностирования. На рис.5.2 показан внешний вид главного окна программы разработанной для проведения диагностики связной радиостанции «Баклан» (программа написана на языке Delphi [116, 118]).

Программа может проводить диагностику радиостанции и прогнозирование состояния (на основе аппроксимации параметра по методу наименьших квадратов).

В главном окне размещается мнемоническая структурная схема радиостанции, с помощью которой индицируется отказ конкретного блока радиостанции. Ниже расположено текстовое поле для вывода результатов проведенной диагностики.

Кроме того, в программе предусмотрены дополнительные возможности (справочная система, редактор базы данных, база данных по режимам работы транзисторов и др.).

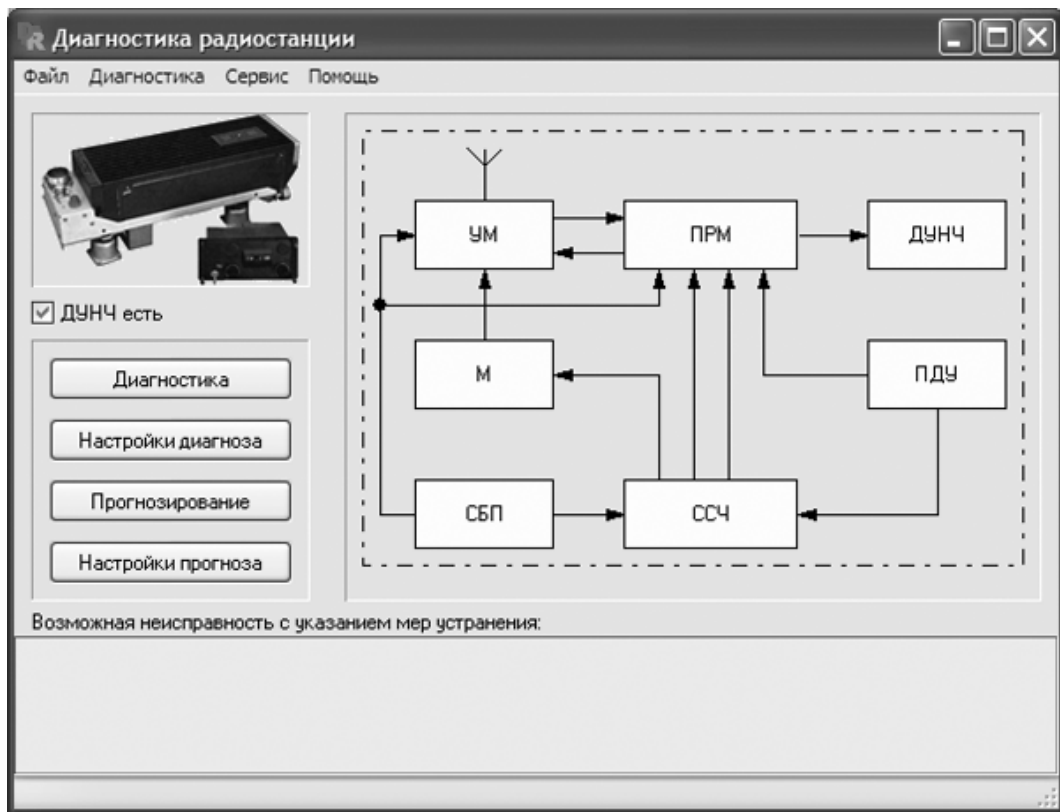


Рис.5.2. Внешний вид главного окна диагностической программы.

В случае обнаружения неисправности блок подсвечивается красным цветом (см. рис.5.3) а в текстовом поле выдается обнаруженная неисправность с указанием возможных мер устранения (или дополнительных проверок для выявления причины отказа).

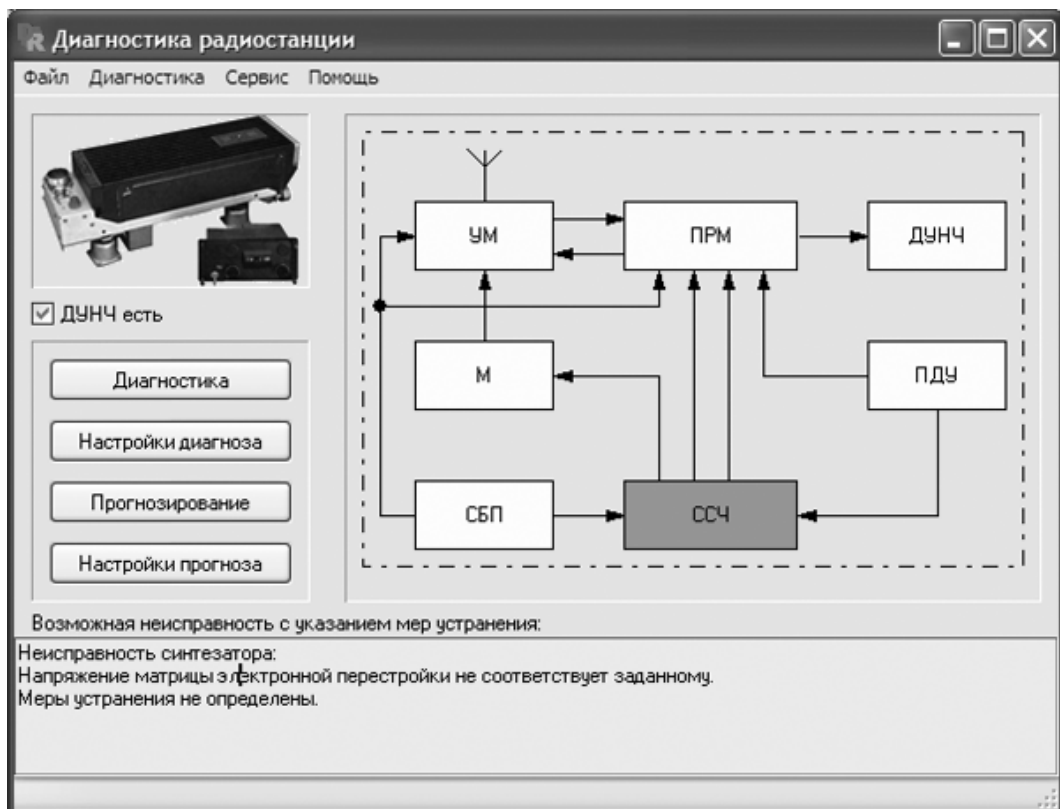


Рис.5.3. При обнаружении неисправности блок подсвечивается красным цветом.

5.2. Модуль получения диагностических данных

Создание подпрограммы обмена (или просто получения) данных является одной из основных задач при разработке диагностического программного обеспечения, так как получение данных от системы встроенного контроля самая первая операция.

По результатам четвертой главы данной диссертации (раздел 4.3) для связи микроконтроллера системы встроенного контроля с персональным компьютером выбран интерфейс RS-232C, обладающий достаточной помехоустойчивостью для применения в системах технического диагностирования и, кроме того, являющийся простым в реализации.

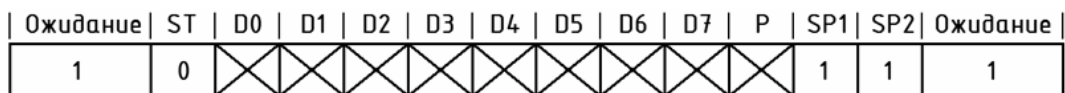


Рис.5.4. Формат посылки данных передаваемой по линии RS-232C.

Формат элементарной посылки данных передаваемых по интерфейсу RS-232C [32] показан на рис.5.4. с указанием логических уровней сигналов (единица или ноль). На рисунке введены следующие условные обозначения: ST – стартовый бит; DX – биты данных; SPX – стоп биты; P – бит паритета (бит четности).

Модуль получения диагностических данных обеспечивает прием данных от устройства встроенной диагностики. Микроконтроллер посылает обработанные диагностические данные на персональный компьютер в формате, показанном на рис.5.5.



Рис.5.5. Формат входных данных для компьютера.

CODE – индивидуальный код радиостанции; RWF – рабочая частота радиостанции; DCD – постоянные напряжения; ACD – переменные напряжения; SSA – сигналы для анализа; DD – дискретные данные.

Данные должны приниматься по интерфейсу RS-232 и сохраняться в отдельном файле для дальнейшего их использования диагностической программой.

Соответственно возникает необходимость написания подпрограммы для работы с COM-портом компьютера [40, 50], в котором реализован интерфейс RS-232.

В настоящее время наиболее используемой операционной системой является Microsoft Windows XP. В этой операционной системе прямой доступ к аппаратным ресурсам компьютера запрещен, и для работы с портами необходимо использовать функции WinAPI (Windows Application Programming Interface) [109, 110], или писать свой драйвер.

Работа с коммуникационными портами в Windows XP эквивалентна работе с файлами [100]. Для инициализации порта используется функция CreateFile. Не будем подробно рассматривать эту функцию, а приведу пример ее использования для порта:

```
PortHandle:=CreateFile(PChar(PortName),generic_read or generic_write,0,nil,open_existing,file_attribute_normal,0);
```

Первый параметр это указатель порта (имя порта PortName может принимать значения 'COMX' или 'LPTX' где X номер порта), второй параметр указывает на то, для чего открыт файл – для чтения или для записи. Третий параметр указывает на то, могут ли к открытому объекту получать доступ другие приложения – для портов он должен быть установлен в ноль. Четвертый параметр это указатель на структуру TSecurityAttributes, если его значение установлено в nil, то данная структура не используется. Пятый параметр функции определяет метод открытия объекта – для портов устанавливается значение open_existing, то есть открыть существующий файл. Вместо file_attribute_normal может быть использован параметр file_flag_overlapped, что необходимо при асинхронных операциях ввода/вывода. Последний параметр это указатель на шаблон файла, в нашем случае он должен быть равным нулю. Если инициализация порта прошла неудачно, то функция возвращает значение invalid_handle_value.

После того как порт открыт, его еще нужно настроить. Это делается несколькими способами, например для этого используют функции GetCommState и SetCommState.

Обе функции содержат указатель на порт и указатель на структуру TDCB. Структура TDCB содержит в себе большое количество параметров (настроек) порта, из которых можно изменить только некоторые, а остальные оставить по умолчанию

BaudRate – скорость работы порта;

StopBits – количество стоповых битов;

Parity – бит паритета (четности);

ByteSize – число бит данных.

Пример установки параметров порта

```
var
    DCB: TDCB;
begin
    GetCommState(PortHandle, DCB);
    with DCB do
        begin
            BaudRate:=CBR_1200; //Скорость работы порта 1200 бод
            StopBits:=ONESTOPBIT; //Один стоп-бит
            Parity:=EVENPARITY; //Дополнение до четности
            ByteSize:=8; //Восемь бит данных
        end;
    SetCommState(PortHandle, DCB);
end;
```

После установки параметров порта необходимо задать временные параметры обмена данными, определяемые структурой TCommTimeouts.

До выполнения этих операций необходимо открыть порт функцией CreateFile.

Для записи и чтения порта используются функции WinAPI – ReadFile и WriteFile.

Прототип процедуры для записи данных в порт приводится ниже.

```
procedure SendCOM(Data: array of real; Size: integer);
var
  PTD: pointer;
  TD: DWORD;
begin
  {Проверка открытия порта}
  if PortHandle=INVALID_HANDLE_VALUE then
    Exit;
  else
  {Передача данных в порт}
  begin
    PTD:=@Data;
    WriteFile(PortHandle, PTD, Size, TD, nil);
    PurgeComm(PortHandle,PURGE_TXCLEAR and PURGE_RXCLEAR);
  end;
end;
```

Аналогично строится функция для чтения данных из порта, только данную функцию желательно выносить в отдельный поток, для того чтобы прием данных был автономным и не мешал работе основной программы. Операция чтения начинается только после того, как в порт начали поступать данные, вследствие чего необходимо постоянно отслеживать состояние порта с помощью функции WaitCommEvent. Без использования потока выполнять другие операции при вызове функции WaitCommEvent невозможно.

Закрытие порта осуществляется функцией CloseHandle.

После того как необходимые данные приняты, они сохраняются в отдельный файл.

Ниже приведен пример программы сохранения принятых данных, находящихся в динамическом массиве Data в файл (файл типизированный).

```
procedure SafeData(Data: array of real; Size: integer);
var
  DiagData: File of real;
  i: integer;
begin
  {Связать файловую переменную с конкретным файлом}
  Assign(DiagData, 'RSData.dst');
  {Открыть файл для записи}
  Rewrite(DiagData);
  {Запись элементов массива данных в файл}
  for i:=0 to Size-1 do
    write(DiagData,Data[i]);
  {Закрытие файла}
  CloseFile(DiagData);
end;
```

После этого данный файл может использоваться основной программой.

5.3. Модуль определения технического состояния

Данный модуль является основным, так как он позволяет решать главную задачу диагностики, то есть определение технического состояния радиоэлектронной аппаратуры. Модуль работает по принципу перебора параметров и сравнения их с базой данных.

Блок-схема модуля определения технического состояния приведена на рис.5.6.

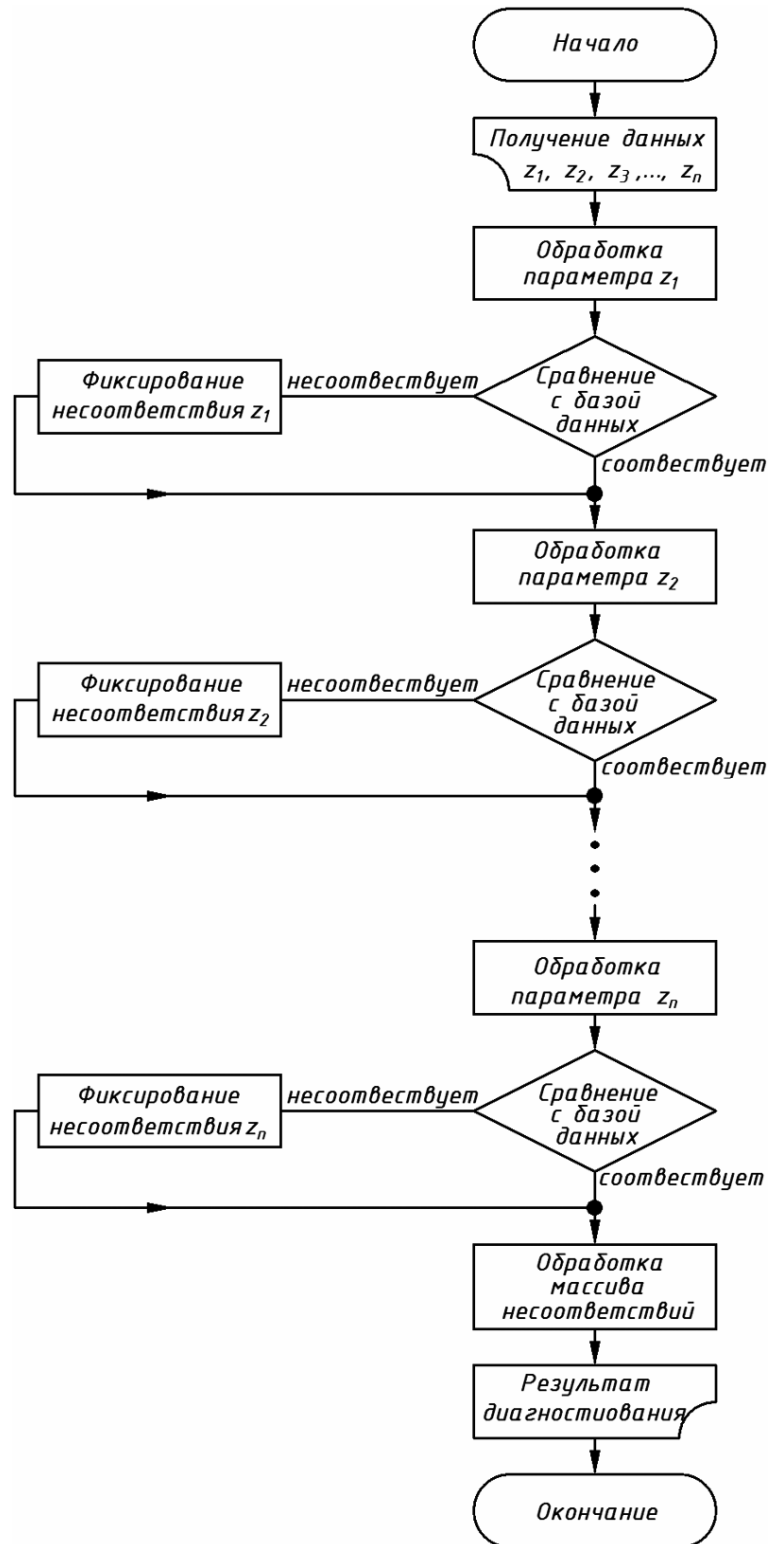


Рис.5.6. Блок-схема модуля определения технического состояния.

5.4. Модуль прогнозирования технического состояния

Разработаем модуль прогнозирования технического состояния на базе аналитической аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Для целей прогнозирования выберем две основные аппроксимирующие функции – полином второй степени и экспоненту. Проведем подробный анализ работы модуля.

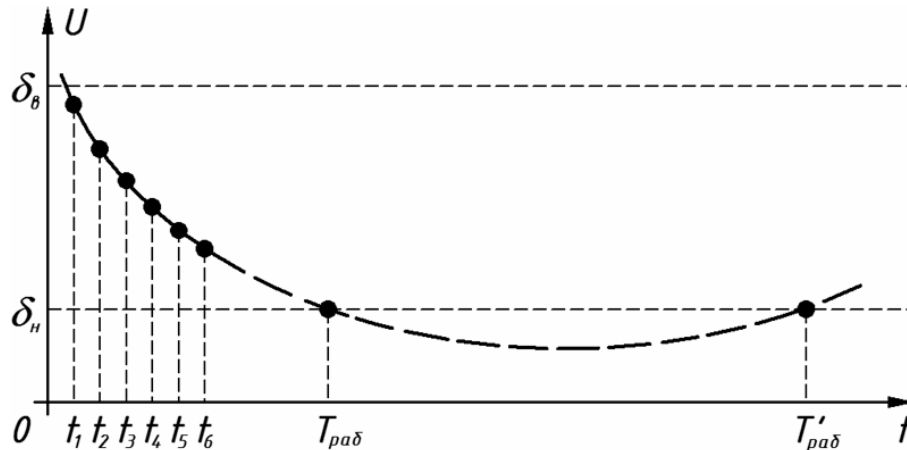


Рис.5.7. Аппроксимация экспериментальных данных.

Рассмотрим случай, когда полученная зависимость имеет вид (см. рис.5.7)

$$u(t) = a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (5.1)$$

Прогнозирование для данной функции можно осуществить в аналитическом виде, это еще одно преимущество использования полиномов с малыми степенями.

Выход системы из состояния работоспособности произойдет, если параметр выйдет за пределы установленных допусков, в данном случае

$$u(t) = \delta \quad (5.2)$$

Перепишем выражение (5.1) с учетом (5.2), тогда будем иметь

$$a_2 t^2 + a_1 t + a_0 - \delta = 0 \quad (5.3)$$

Полученное уравнение является квадратным и можно без проблем решить стандартным способом. Прежде всего, вычисляем дискриминант уравнения

$$D = a_1^2 - 4a_2(a_0 - \delta) \quad (5.4)$$

Если $D \geq 0$ уравнение имеет действительные корни и алгоритм может быть продолжен, если $D < 0$ уравнение не имеет действительных корней и алгоритм прекращается.

В этом случае пользователю будет выдаваться сообщение о невозможности прогнозирования, и предлагается использовать другую аппроксимирующую функцию.

Если $D \geq 0$ то корни уравнения (5.3) определяются выражением

$$t_{1,2} = \frac{-a_1 \pm \sqrt{D}}{2a_2} \quad (5.5)$$

При определении одного из корней (5.5) следует учитывать выпуклость и вогнутость кривой, а также ее наклон на рассматриваемом временном участке (см. табл.5.1).

Табл.5.1. К пояснению выбора корня уравнения.

Вогнутость кривой	Наклон кривой	Правильный корень
$\frac{u(t_1)+u(t_n)}{2} > u(t_{cp}),$ или $a_2 < 0$	$u(t_1) < u(t_n)$	меньший
	$u(t_1) > u(t_n)$	большой
$\frac{u(t_1)+u(t_n)}{2} < u(t_{cp}),$ или $a_2 > 0$	$u(t_1) < u(t_n)$	большой
	$u(t_1) > u(t_n)$	меньший

В случае равных корней (то есть при $D=0$) полученные результаты менее достоверны, поэтому пользователю должно выдаваться сообщение об этом.

Оценка достоверности прогнозирования представляет весьма интересную и сложную задачу, решению которой вполне можно было бы посвятить отдельную работу.

Определенные общие критерии оценки точности и достоверности прогнозирования технического состояния в настоящее время еще не достаточно проработаны и в этой сфере имеется большое обширное поле для исследований. В каждом конкретном случае достоверность полученных результатов оценивается разными способами.

Достоверность полученных результатов можно оценить исходя из соображений, чтобы разница между корнями уравнения была больше периода прогнозирования

$$T_{np} = T_{раб} - t_n \quad (5.6)$$

так как в этом случае кривая на участке прогнозирования изменяется медленно.

С другой стороны, если время прогнозирования намного больше, чем известный участок кривой, то вероятность правильного прогнозирования снизится, то есть

$$T_{np} > t_n - t_1 \quad (5.7)$$

Критерий можно записать и в следующем виде

$$T'_{раб} - T_{раб} > T_{np} \quad (5.8)$$

Если корни уравнения удовлетворяют критерию (5.8), то можно говорить о достоверности прогнозирования, если нет, то полученные результаты сомнительны.

Блок-схема модуля прогнозирования приведена на рис.5.8. Программа вычисляет возможность использования квадратичного полинома, и это невозможно пользователю предлагается использовать экспоненциальную аппроксимацию. В противном случае предполагаемое время работоспособности объекта диагностирования вычисляется, с использованием квадратичной функции для анализа выбранного определяющего параметра¹.

¹ При необходимости можно использовать и несколько параметров одновременно.

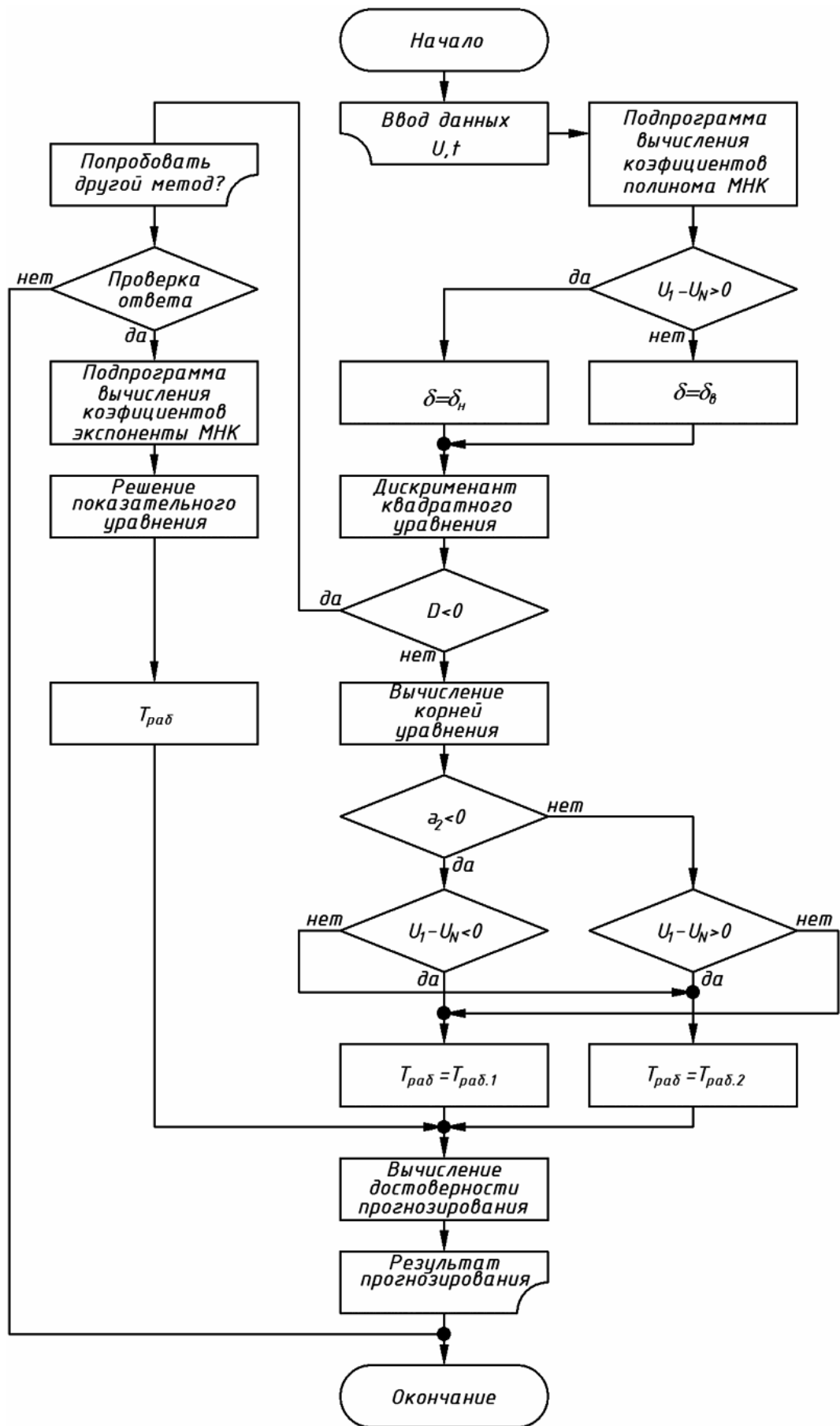


Рис.5.8. Блок-схема модуля прогнозирования.

Выводы о проделанной работе

Проведенные исследования в ходе выполнения данной работы позволяют создать более совершенные и высокоэффективные диагностические системы. С целью повышения эффективности функционирования системы технической диагностики в настоящей диссертации проводится ряд научных исследований, направленных на улучшение и разработку алгоритмов диагностирования. Например, для более эффективного поиска места отказа, предлагается использовать методы оптимизации функций – метод золотого сечения и оптимальный метод Фибоначчи. Реализация данных методов позволяет заметно сократить время поиска отказа в сложной радиоэлектронной системе, особенно при большом количестве элементов. Для оценки стабильности диагностического параметра рекомендуется использовать периодический контроль определяющих параметров, с сохранением полученных данных во flash-память, и последующим их анализом на персональном компьютере. Применение запоминающего устройства в составе системы встроенной диагностики позволит более эффективно проводить прогнозирование технического состояния диагностируемого объекта и выявлять наиболее ненадежные блоки радиоэлектронного оборудования, а в ряде случаев даже отдельные элементы, задолго до наступления их отказа. Проведен сравнительный анализ различных методов получения и обработки диагностических параметров, и предложен способ получения параметров амплитудно-модулированного сигнала с использованием синхронного детектирования с детальным его анализом. В данной работе предлагается использовать интегрированные микропроцессорные структуры для проведения периодического контроля радиоэлектронного оборудования с выдачей результатов диагностики техническому персоналу и экипажу в удобной для восприятия форме. Средства встроенной диагностики радиоэлектронного оборудования предлагается использовать совместно с персональным компьютером, что позволит реализовать более эффективные и сложные алгоритмы технического диагностирования. В работе проведен анализ возможности применения в диагностической системе различных интерфейсов связи микроконтроллера и персонального компьютера с позиции рассмотрения их устойчивости к воздействию помех. При создании диагностической системы важное место занимает создание многофункциональных генераторов тестовых воздействий. В настоящей работе эта проблема решается за счет применения в качестве генераторов тестовых сигналов DDS-синтезаторов. Применение подобных генераторов сигналов позволит реализовать сложные алгоритмы диагностирования, и как следствие повысить эффективность диагностирования. При применении результатов исследований, проведенных в данной работе, можно значительно повысить качество работы систем диагностики и контроля, и сократить время проведения технического диагностирования без снижения его качества.

Информационные источники

Список использованной литературы

1. Цыбин В.В., Шукуров А.Г., Эшмурадов Д.Э. «Современные методы диагностики бортового радиоэлектронного оборудования». – Ташкент: Материалы Республиканской научно-технической и производственной конференции «Проблемы развития авиакосмической отрасли Республики Узбекистан», ТГАИ, 2007. – 131-134с.
2. Цыбин В.В. «Применение микросхем flash-памяти в бортовых накопителях информации». – Ташкент: Материалы научно-технической конференции «Эксплуатация воздушных судов и проблемы обеспечения безопасности полетов», ТГАИ, 2006. – 55-58с
3. Цыбин В.В., Закиров Р.Г., Эшмурадов Д.Э. «Вопросы помехоустойчивости способов модуляции в перспективных системах вторичной радиолокации». – Ташкент, Журнал «Проблемы информатики и энергетики». 2007;
4. Цыбин В.В. «Оптимизация поиска места отказа при диагностике радиоэлектронных систем». – Ташкент: ТГАИ, 2008.
5. Закиров Р.Г., Цыбин В.В., Эшмурадов Д.Э. «Разработка диагностического комплекса для проверки самолетных датчиков дыма». – Ташкент, ТГТУ. 2007;
6. Цыбин В.В., Жураев А.М., Гайипов Д.Д. «Вопросы обеспечения данными при анализе надежности радиоэлектронного оборудования летательных аппаратов». – Ташкент, Материалы научно-практической конференции посвященной 50-летию Авиакосмического Факультета, ТГАИ, 2006. 81–83с.
7. Агуров П.В. «Практика программирования USB». – СПб.: БХВ-Петербург, 2006, – 624с.
8. Айфичер Э., Джервис Б. «Цифровая обработка сигналов: Практический подход». Пер. с англ. – М.: «Вильямс», 2004. – 992с.
9. Бабаков М.Ф., Попов А.В., Луханин М.И. «Математические модели электронных аппаратов и систем». – Учебное пособие. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт», 2003, 109с.
10. Байда Н.П., Кузмин И.В., Шпилевой В.Т. «Микропроцессорные системы поэлементного диагностирования РЭА». – М.: «Радио и Связь», 1987. – 256с.
11. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. «Численные методы». – М.: «Наука», 1990. – 630с.
12. Белашев В.Ю., Чернова Н.М. «Эффективные алгоритмы и программы вычислительной математики». – Магадан: «СВКНИИ ДВО РАН», 1997. 160с.
13. Берж К. «Теория графов и ее применения». Пер. с франц. – М.: «Издательство иностранной литературы», 1962. – 320с.

14. Борисов Ю.П., Цветнов В.В. «Математическое моделирование радиотехнических систем и устройств». – М.: «Радио и Связь», 1985. – 176с.
15. Бочкарев В.В., Кравцев В.Ф., Крыжанский Г.А. «Концепции и системы CNS/АТМ в гражданской авиации». Под ред. Г.А. Крыжанского. – М.: «Академкнига», 2003. 400с.
16. Гёлль П. «Как превратить персональный компьютер в измерительный комплекс». Пер. с франц. – М.: «ДМК», 1999, – 144с.
17. Голд Б., Рэйдер Ч. «Цифровая обработка сигналов». Перевод с английского. Под. ред. А.М. Трахтмана. – М.: «Советское радио». 1973, – 368с.
18. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. «Цифровая обработка сигналов». – М.: «Радио и связь», 1990. – 256с.
19. Гоноровский И.С. «Радиотехнические цепи и сигналы». – М.: «Радио и связь», 1986. – 512с.
20. Граф Ш., Гессель М. «Схемы поиска неисправностей». Перевод с немецкого. – М.: «Энергоатомиздат», 1989, – 144с.
21. Гринзоу Лу. «Философия программирования для Windows 95/NT» Перевод с английского – СПб.: «Символ-Плюс», 1997. – 640с.
22. Гришин Ю.П., Игнатов В.П., Казаринов Ю.М. и др. «Радиотехнические системы». Под редакцией Ю.М. Казаринова. – М.: «Высшая школа», 1990. – 496с.
23. Гук М. «Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия». – СПб.: «Питер», 2002. – 528с.
24. Давыдов П.С. «Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем». – М.: «Радио и связь», 1988. – 256с.
25. Давыдов П.С., Иванов П.А. «Эксплуатация авиационного радиоэлектронного оборудования». Справочник. – М.: «Транспорт», 1990. – 240с.
26. Дашенко А.Ф., Кирилов В.Х. и др. «MatLab в инженерных и научных расчетах». Монография. – Одесса: «Астропринт», 2003. – 214с.
27. Дворяшин Б.В. «Основы метрологии и радиоизмерения». – М.: «Радио и Связь» 1993. – 320с.
28. Дьяконов В., Круглов В. «Математические пакеты расширения MATLAB». Специальный справочник. – СПб.: «Питер», 2001. – 480с.
29. Дьяконов В.П. «MATLAB 6. Учебный курс». – СПб.: «Питер», 2001. – 592с.
30. Карташев В.Г. «Основы теории дискретных сигналов и цифровых фильтров». – М.: «Высшая школа», 1982. – 110с.
31. Ким Д.П. «Теория автоматического управления. Линейные системы.» Учеб. пособие. – М.: «ФИЗМАТЛИТ», 2003. – 288с.

32. Кузьминов А.Ю. Интерфейс RS232. Связь между компьютером и микроконтроллером. – М.: Радио и связь, 2004. – 168 с.
33. Леонов А.И., Н.Ф. Дубровский. «Основы технической эксплуатации бытовой радиоэлектронной аппаратуры». – М.: «Легпромбытиздат», 1991. – 272с.
34. Лихтциндер Б.Я. «Внутрисхемное диагностирование узлов радиоэлектронной аппаратуры». – М.: Техника, 1988. – 168с.
35. Марпл С.Л.мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения /Под ред И.С.Рыжакова. - М.: Мир, – 1990. – 552с.
36. Мидлтон Р. «Наладка и ремонт радиоэлектронных устройств, не имеющих технического описания». Пер. с англ. /Под ред. Ф.Н. Покровского/. – М.: «Энергоатомиздат», 1994. – 304с.
37. Мортон Дж. «Микроконтроллеры AVR. Вводный курс». Пер. с англ. – М.: «Додэка», 2006. – 272с.
38. Мудров А.Е. «Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль». – Томск: МП «РАСКО», 1991. 272с.
39. Мэтьюс Дж. Г., Финк К.Д. «Численные методы. Использование MATLAB». Перевод с английского – М.: «Вильямс», 2001. 720с.
40. Несвижский В. «Программирование аппаратных средств в Windows». – СПб.: БХВ-Петербург, 2004, – 880с.
41. Новиков А.А., Амелина М.А. «Математическое моделирование в электронике». Конспект лекций. – Смоленск: Издательство филиала МЭТУ. 2006. – 74с.
42. Нуссбаумер Г. «Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток». Пер. с англ. – М.: «Радио и Связь», 1985. – 248с.
43. Оппенгейм А.В., Шафер Р.В. «Цифровая обработка сигналов». Перевод с английского. Под. ред. С.Я. Шаца. – М.: Связь, 1979, – 416с.
44. Пейтон Дж., Волш В. «Аналоговая электроника на операционных усилителях». – М.: «БИНОМ», 1994. – 352с.
45. Пис Р.А. «Практическая электроника аналоговых устройств. Поиск неисправности и обработка проектируемых схем». Перевод с английского – М.: ДКМ «Пресс», 2001, 320с.
46. Пис Р.А. «Обнаружение неисправности в аналоговых схемах». Перевод с английского. – М.: Техносфера, 2007, – 192с.
47. Семёнов Б.Ю. «Шина I²S в радиотехнических конструкциях». – М.: «СОЛОН-Р», 2002. – 192с.
48. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер. 2002. – 608с.

49. Сизиков В.С. «Устойчивые методы обработки результатов измерений». – СПб.: «Спец-Лит», 1999. – 240с.
50. Смит Дж. «Сопряжение компьютеров с внешними устройствами». Пер. с англ. – М.: «Мир», 2000. – 266с.
51. Таунсенд К., Фохт Д. «Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ». Пер. с англ. – М.: «Финансы и статистика», 1990, – 320с.
52. Трамперт В. «Измерение, управление и регулирование с помощью AVR микроконтроллеров». Пер. с нем. – К.: «МК-Пресс», 2006. – 208с.
53. Фролов А.В. Фролов Г.В. «Аппаратное обеспечение IBM PC». Ч. I. – М.: 1992г. – 208с
54. Фролов В.И. «Техническая диагностика и управление надежностью РЭО». Тексты лекций. – СПб.: Академия Гражданской Авиации, 1995. – 64с.
55. Шпак Ю.А. «Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров». – К.: «МК-Пресс», 2006. – 400с.
56. Goldberg B.G. «Digital frequency synthesis demystified. DDS and fractional-N PLLs». Technology Publishing. 1999, – 336p.
57. «Specification for COSPAS/SARSAT 406 MHz distress beacons». C/S T.001 Issue 3, Revision 7, November 2005.
58. «Introduction to the COSPAS/SARSAT system». C/S G.003 Issue 5, October 1999.
59. «COSPAS/SARSAT guidelines on 406 MHz beacon coding, registration and type approval». C/S G.005 Issue 2, Revision 2, October 2006
60. «125 MHz Complete DDS Synthesizer AD9850». Datasheet. Analog Devices, Inc., 1999.
61. «1 GSPS Direct Digital Synthesizer AD9858». Datasheet. Analog Devices, Inc., 1999.
62. «400 MSPS, 10-Bit, 1.8 V CMOS Direct Digital Synthesizer AD9859». Datasheet. Analog Devices, Inc., 2004.
63. «Craft Port Tiny RS-232 Transceiver for Portable Applications ADM101E». Datasheet. Analog Devices, Inc., 2001.
64. «8-bit Microcontroller ATmega16(L) with 16K Bytes In-System Programmable Flash». Datasheet. Atmel Corporation, 2007.
65. «Serial Data Flash». Application Note. Atmel Corporation, 2001.
66. «8-megabyte, 4-megabyte and 2-megabyte Data Flash Cards». Datasheet. Atmel Corporation, 2001.
67. «Радиостанция «Баклан»». Руководство по технической эксплуатации. Регламент технического обслуживания, 1988.

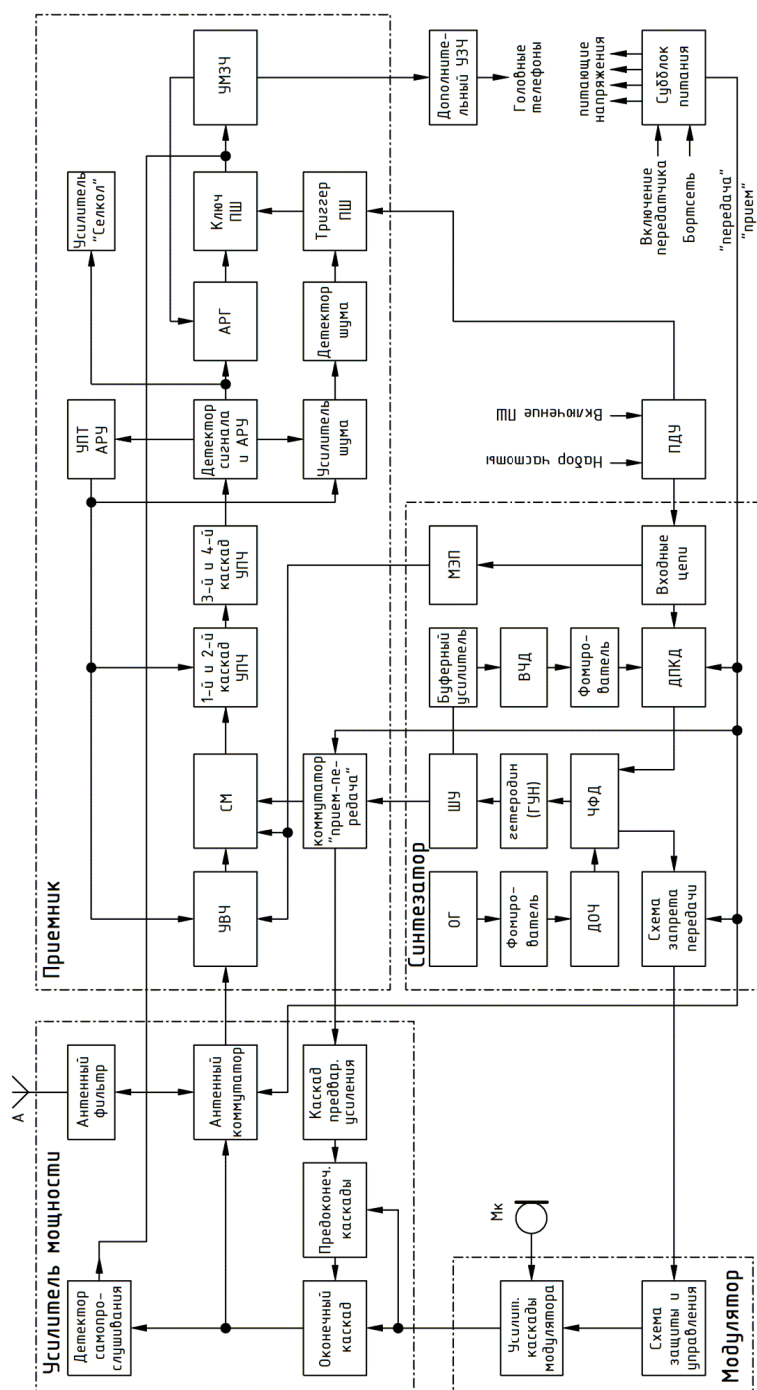
Интернет источники

68. <http://www.info-system.ru/expert/expert.html> (информация по экспертным системам)
69. <http://www.spbstu.ru> (помехоустойчивость передачи дискретных сообщений)
70. <http://avr123.nm.ru> (учебный курс по микроконтроллерам серии AVR)
71. <http://proteus123.narod.ru/01.htm> (учебный курс по PROTEUS)
72. <http://www.gaw.ru> (информация по применению микроконтроллеров)
73. <http://www.honeywell.com> (сайт фирмы Honeywell).
74. <http://www.acssonboard.com> (сайт фирмы ACSS)
75. <http://www.interavionics.com> (самолетная авионика)
76. <http://www.rockwellcollins.com> (сайт фирмы Rockwell & Collins)
77. <http://tdpolyot.ru> (сайт торгового дома «Полет» челябинского радиозавода)
78. <http://www.rp-kzn.ru> (сайт ОАО «Радиоприбор»)
79. <http://radar.net.ua/cms/ru/> (сайт ОАО «Киевский завод «Радар»»)
80. <http://yarz.ru> (сайт ОАО «Ярославский радиозавод»)
81. <http://www.radioscanner.ru> (информации по РЭО ЛА и по теории радиотехники)
82. <http://electrosignal.ru> (сайт завода «Электросигнал»)
83. <http://www.gzas.nnov.ru> (ОАО «Горьковский завод аппаратуры связи им. А.С. Попова»)
84. <http://www.cospas-sarsat.org> (официальный сайт КОСПАС/SARSAT)
85. <http://www.ultranet.ru> (информация по системе КОСПАС/SARSAT)
86. <http://www.kiam1.rssi.ru> (литература, касающаяся системы КОСПАС/SARSAT)
87. <http://www.aeroreview.ru> (авиационный интернет-журнал)
88. <http://avr.nikolaew.org> (курс по программированию AVR микроконтроллеров)
89. <http://yusoft.kulichki.com> (программирование МК и PC)
90. <http://www.fftw.org> (быстрое преобразование Фурье)
91. <http://delphibasics.ru> (он-лайн справочник по Delphi)
92. <http://programmersclub.ru> (программирование на Delphi)
93. <http://www-sbras.nsc.ru> (обзор методов безусловной оптимизации функций)
94. <http://articles.excelion.ru> (алгоритмы методов «золотого сечения» и Фибоначчи)
95. <http://iasa.org.ua> (прямые методы одномерного поиска минимума функции)
96. <http://math.tsu.ru> (линейный поиск без использования производных)
97. <http://dsp-book.narod.ru/books.html> (материалы по DDS-синтезаторам)
98. <http://lord-n.narod.ru> (ссылки на книги по электронике)
99. <http://www.telesys.ru> (конференция «телесистемы»)
100. <http://www.pcports.ru> (сопряжение PC с внешними устройствами)

101. <http://dasbook.ru> (книги по электронике и программированию)
102. <http://ihtik.lib.ru> (большое количество книг по радиоэлектронике и т.д.)
103. <http://www.info-system.ru> (экспертные системы)
104. <http://osp.aanet.ru> (GPS, ГЛОНАСС, КОСПАС/SARSAT)
105. <http://www.infocosmo.ru> (доплеровские методы определения координат)
106. <http://www.cta.ru> (доплеровские методы определения координат)
107. <http://matlab.exponenta.ru> (русскоязычный ресурс по системе MatLab)
108. <http://www.mathworks.com> (сайт производителя системы MatLab)
109. <http://win-api.narod.ru> (описание функций WinAPI)
110. <http://develab.narod.ru> (справочник по WinAPI функциям)
111. <http://www.lookrs232.com> (программирование СОМ порта, интерфейс RS-232)
112. <http://www.delphikingdom.ru> (программирование в среде Delphi)
113. <http://www.mussonmarine.com/ru> (диагностика аварийных морских радиобуев)
114. <http://www.toroid.ru> (литература по электронике, обработке сигналов и т.д.)
115. <http://sonder.ru> (алгоритмы преобразования Фурье)
116. <http://www.delphisources.ru> (программирование на Delphi)
117. <http://articles.org.ru> (статьи по программированию)
118. <http://www.excode.ru> (программирование на Delphi)
119. <http://delphiworld.narod.ru> (программирование на Delphi)
120. <http://labcenter-electronics.com> (сайт PROTEUS)
121. <http://www.natahaus.ru> (интернет-библиотека)
122. <http://nehudlit.ru> (интернет-библиотека)
123. <http://el-bock.narod.ru> (интернет-библиотека)
124. <http://relativity.by.ru> (интернет-библиотека)

Приложения

Приложение 1. Функциональная схема радиостанции «Баклан»



Функциональная схема радиостанции «Баклан».

на рисунке приняты обозначения: УВЧ – усилитель высокой частоты; СМ – смеситель; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; УПТ – усилитель постоянного тока; АРУ – автоматическая регулировка усиления; АРГ – автоматическая регулировка громкости; ПШ – подавитель шума; УЗЧ – усилитель звуковой частоты; УМЗЧ – усилитель мощности звуковой частоты; ОГ – опорный генератор; ШУ – широкополосный усилитель; МЭП – матрица электронной перестройки; ГУН – генератор, управляемый напряжением; ДОЧ – датчик опорных частот; ЧФД – частотно-фазовый детектор; ДПКД – делитель с переменным коэффициентом деления; ПДУ – пульт дистанционного управления.

Приложение 2. Подпрограмма вычисления быстрого преобразования Фурье

В данном приложении приводится код разработанной подпрограммы вычисления быстрого преобразования Фурье на языке Delphi (сама подпрограмма вынесена в DLL).

```
////////////////////////////////////  
// Программа вычисления БПФ, Автор: Цыбин Виталий //  
////////////////////////////////////  
type  
  TComplex = record  
    Re: real;  
    Im: real;  
  end;  
  
begin  
procedure fft(var Data: array of TComplex;  
const N: integer; inv: boolean);  
var  
  LM, NM, su, sd, i, m, k, N2: integer  
  W: array of TComplex;  
  F: array of TComplex;  
  procedure bit_rev(var Data: array of TComplex;  
const N: integer);  
  procedure Wkk(W: array of TComplex;  
const N2: integer; inv: boolean);  
begin  
  procedure bit_rev(var Data: array of TComplex;  
const N: integer); {Перестановка элементов входного массива}  
  var  
    M, i, k, s: integer;  
    L: integer;  
    B: array of TComplex;  
  begin  
    L:=N;  
    M:=1;  
  repeat  
    L:=round(L/2);  
    for i:=0 to M-1 do  
      begin  
        s:=2*i*L;  
        for k:=0 to L-1 do  
          begin  
            B[k+s]:=D[2*k+s];  
            B[k+L+s]:=D[2*k+1+s];  
          end;  
        end;  
      for i:=0 to N-1 do {Копирование буфера в массив данных}  
        begin  
          D[i]:=B[i];  
        end;  
      M:=M*2;  
    until L=2;  
end;  
end;
```

```

procedure Wkk(W: array of TComplex; const N2: integer;
inv: boolean); {Вычисление поворачивающих множителей}
var
  t: real;
begin
  t:=2*pi/N;
if inv=false then
  begin
    for k:=0 to N2 do
      begin
        W[k].Re:=cos(t*k);
        W[k].Im:=-sin(t*k);
      end;
    end
  else
  begin
    for k:=0 to N2 do
      begin
        W[k].Re:=cos(t*k);
        W[k].Im:=sin(t*k);
      end;
    end;
  end;
  {Вычисление быстрого преобразования Фурье}
  N2:=round(N/2);
  SetLenght(W,N2);
  Wkk(W,N2,inv);
  bit_rev(Data,N);
  LM:=1;
  repeat
    LM:=LM*2;
    NM:=round(N/LM);
    for i:=0 to NM-1 do
      begin
        su:=i*LM;
        sd:=round(LM/2+i*LM);
        for m:=0 to LM/2-1 do
          begin
            F[m+su]:=add_clx(D[m+su],mul_clx(D[m+sd],W[m*N2]));
            F[m+sd]:=sub_clx(D[m+su],mul_clx(D[m+sd]*W[m*N2]));
          end;
        end;
      end;
    D:=F;
  until LM=N;
  {Подготовка результатов преобразования}
  if inv=false then
    for i:=0 to N-1 do Data[i]:=F[i]
  else
    for i:=0 to N-1 do Data[i]:=F[i]/N;
  end;
end.

```

Приложение 3. Подпрограммы для работы с USART микроконтроллера

Для работы с USART микроконтроллера ATmega16L используются три отдельных подпрограммы – подпрограмма инициализации USART, подпрограмма передачи данных и подпрограмма приема данных. Предполагается, что данные для передачи находятся в регистре R16, туда же помещаются принятые данные. При установке скорости обмена используются регистры R16 и R17. Код подпрограмм приведен ниже.

```
; подпрограмма инициализации USART
USART_Init:
    ; устанавливаем скорость передачи
    out UBRRH, r17
    out UBRRL, r16
    ; включаем приемник и передатчик
    ldi r16, (1<<RXEN) | (1<<TXEN)
    out UCSRB, r16
    ; устанавливает формат данных: 8бит данных, 2 стоп-бита
    ldi r16, (1<<URSEL) | (1<<USBS) | (3<<UCSZ0)
    out UCSRC, r16
ret

; подпрограмма передачи данных
USART_Transmit:
    ; ждать пока закончится предыдущая передача
    sbis UCSRA, UDRE
    rjmp USART_Transmit
    ; передать данные в буфер, передать данные
    out UDR, r16
ret

; подпрограмма приема данных
USART_Receive:
    ; ждать принимаемых данных
    sbis UCSRA, RXC
    rjmp USART_Receive
    ; принять и передать данные из буфера
    in r16, UDR
ret
```

Приложение 4. Подпрограммы для работы с интерфейсом SPI

Для реализации передачи данных по интерфейсу SPI используются подпрограммы приведенные ниже. Подпрограмма SPI_MasterInit для инициализации SPI в режиме Master , и подпрограмма передачи данных SPI_MasterTransmit. Тексты подпрограмм на ассемблере ATmega16L приведены ниже. Предполагается, что данные для передачи находятся в регистре R16, а регистр R17 используется для настройки SPI.

```
; подпрограмма инициализации SPI
SPI_MasterInit:
    ; конфигурируем MOSI, SLK и SS как выходы, а MISO как вход
    ldi r17, (1<<DD_MOSI) | (1<<DD_SCK) | (1<<DD_SS)
    out DDR_SPI, r17
    ; включить SPI в режиме Master, тактовая частота SPI
    ; равна тактовой частоте микроконтроллера поделенной на 16
    ldi r17, (1<<SPE) | (1<<MSTR) | (1<<SPR0)
    out SPCR, r17
ret

; передача данных
SPI_MasterTransmit:
    ; начало передачи данных
    out SPDR, r16
Wait_Transmit:
    ; ожидание окончания передачи
    sbis SPSR, SPIF
    rjmp Wait_Transmit
ret
```