

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

Кафедра технической эксплуатации
радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта

**НАДЕЖНОСТЬ
И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА
ТРАНСПОРТНОГО РО**

**РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ
И ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ
ОПАСНОСТИ ОТКАЗОВ СИСТЕМ
ТРАНСПОРТНОГО РАДИООБОРУДОВАНИЯ**

Учебно-методическое пособие

*для студентов IV курса
направления 25.05.03
всех форм обучения*

Под редакцией Н.В. Гевака

Москва
ИД Академии Жуковского
2025

УДК 621.3.019.3
ББК 0561.5
Н17

Рецензент:

Петров В.И. – канд. техн. наук, доцент

Авторский коллектив:

канд. техн. наук, доцент Гевак Н.В.; ст. преп. Адамов Д.С.; ст. преп. Биктеева Е.Б.;
канд. техн. наук, доцент Матюхин К.Н.; канд. техн. наук, доцент Костенков В.А.;
ст. преп. Прокофьев И.О.; канд. техн. наук, доцент Яковлева Д.А.

Н17 **Надежность и техническая диагностика транспортного РО.
Расчет надежности и оценка функциональной опасности отказов
систем транспортного радиооборудования [Текст] : учебно-методи-
ческое пособие по изучению дисциплины / под ред. Н.В. Гевака. – М.: ИД
Академии Жуковского, 2025. – 80 с.**

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Надежность и техническая диагностика транспортного РО» по учебному плану направления подготовки 25.05.03 всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 14.03.2025 г. и методического совета 14.03.2025 г.

**УДК 621.3.019.3
ББК 0561.5**

В авторской редакции

Подписано в печать 25.06.2025 г.
Формат 60x84/16 Печ. л. 5 Усл. печ. л. 4,65
Заказ № 1093/0522-УМП03 Тираж 25 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., д. 6А
Тел.: (499) 755-55-43
E-mail: zakaz@itsbook.ru

© Московский государственный технический
университет гражданской авиации, 2025

Содержание

	Стр.
Перечень принятых сокращений	4
Введение	5
1. Общие положения	6
2. Обоснование требований к надежности проектируемой системы и разрабатываемого устройства	9
2.1 Постановка задачи	9
2.2 Содержание расчетов	10
3. Расчет надежности проектируемой системы и разрабатываемого устройства	14
3.1 Постановка задачи	14
3.2 Содержание расчетов	14
3.2.1 Расчет показателей безотказности проектируемого устройства	14
3.2.2 Рекомендации по повышению безотказности разрабатываемого устройства	22
3.2.3 Оценка показателей безотказности проектируемой системы	25
3.2.4 Оценка показателей ремонтпригодности	25
3.2.5 Методика расчёта надежности	28
4. Методика оценки безопасности проектируемых систем транспортного РО	29
4.1 Общая структура методики оценки безопасности системы	29
4.2 Оценка функциональной опасности.	36
4.3 Анализ дерева отказов	37
4.4 Оценка безопасности системы	40
4.5 Анализа функциональных отказов на примере радиовысотомера А-053-08	41
Список первоисточников	58
Приложение А	59
Приложение Б	64
Приложение В	67
Приложение Г	68

Перечень принятых сокращений

АВПО,	– анализ видов и последствий отказа, failure mode and effects analysis
FMEA	
АДО,	– анализ дерева неисправности, fault tree analysis
FTA	
АЛС,	– анализ логической схемы
DD	
АОП,	анализ общих причин, common cause analysis
ССА	
АРК	– автоматический радиоконпас
ВС	– воздушное судно
ВТ	– воздушный транспорт
ЖЦ	– жизненный цикл
ЗИП	– запасные части, инструменты и принадлежности
НД	– нормативный документ, нормативные документы
ОБС,	– оценка безопасности системы, system safety assessment
SSA	
ОФО,	– оценка функциональной опасности, functional hazard assessment
ФНА	
ПОБС,	– предварительная оценка безопасности системы, preliminary
PSSA	system safety assessment
ПН	– показатели (показатель) надежности
ПОН	– программа обеспечения надежности
РО	– радиооборудование
СВПО,	сводка видов и последствий отказов, failure modes and effects
FMES	summary
ТЗ	– техническое задание
ЭРИ	– электрорадиоизделия

Введение

При разработке новых образцов транспортного радиооборудования (РО) требуется обеспечить выполнение, в том числе, требований технического задания (ТЗ) по надежности.

Обеспечение требуемых показателей надежности является системной задачей и должно производиться на следующих этапах жизненного цикла объектов транспортного РО: разработка, производство и эксплуатация. Недостаточное внимание к этим вопросам на любом из этапов может привести к тому, что конечный результат – достижение заданных показателей надежности – не будет обеспечиваться. Поэтому каждому радиоинженеру необходимо представлять характер основных задач по обеспечению надежности на всех этапах и знать пути их решения. Проблема обеспечения надежности на всех этапах жизненного цикла объектов РО является весьма обширной как по составляющим ее задачам, так и по применяемым методам решения, и поэтому в рамках учебного пособия не может быть освещена достаточно подробно.

Цель настоящего пособия состоит в том, чтобы изложить характерные для этапа разработки задачи обеспечения надежности транспортного РО и рассмотреть типовые способы их решения.

Также в пособии рассмотрены вопросы, связанные с оценкой функциональной опасности отказов устройств и систем радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта, как бортового, так и наземного.

1. Общие положения

Расчет надежности – это процедура определения значений показателей надежности объекта с использованием методов, основанных на их вычислении по справочным данным о надежности элементов объекта, по данным о надежности объектов-аналогов, данным о свойствах материалов и другой информации, имеющейся к моменту расчета [1].

При выполнении опытно-конструкторской работы по созданию нового образца транспортного РО разрабатывается и затем выполняется на всех стадиях жизненного цикла (ЖЦ) изделия программа обеспечения надежности (ПОН). Программа устанавливает цели расчета надежности на каждом этапе стадий жизненного цикла, применяемые при расчете нормативные документы и методики, сроки выполнения расчета и исполнителей, порядок оформления, представления и контроля результатов расчета.

Основными целями расчета надежности, в зависимости от стадии ЖЦ и этапа работ, являются:

- обоснование количественных требований по надежности к объекту или его составным частям;
- проверку выполнимости установленных требований и/или оценку вероятности достижения требуемого уровня надежности объекта в установленные сроки и при выделенных ресурсах, обоснование необходимых корректировок установленных требований;
- сравнительный анализ надежности вариантов схемно-конструктивного построения объекта и обоснование выбора рационального варианта;
- определение достигнутого (ожидаемого) уровня надежности объекта и/или его составных частей, в том числе расчетное определение показателей надежности или параметров распределения характеристик надежности составных частей объекта в качестве исходных данных для расчета надежности объекта в целом;
- обоснование и проверку эффективности предлагаемых (реализованных) мер по доработкам конструкции, технологии изготовления, системы технического обслуживания и ремонта объекта, направленных на повышение его надежности;
- решение различных оптимизационных задач, в которых показатели надежности выступают в роли целевых функций, управляемых параметров или граничных условий, в том числе таких, как оптимизация структуры объекта, распределение требований по надежности между показателями отдельных составляющих надежности (например безотказности и ремонтпригодности), расчет комплектов ЗИП, оптимизация систем технического обслуживания и ремонта, обоснование гарантийных сроков и назначенных сроков службы (ресурса) объекта и др.;
- проверку соответствия ожидаемого (достигнутого) уровня надежности объекта установленным требованиям (контроль надежности), если прямое

экспериментальное подтверждение их уровня надежности невозможно технически или нецелесообразно экономически.

Последовательность основных действий при расчете надежности, как правило, следующая:

- идентификация объекта, подлежащего расчету;
- определение целей и задач расчета на данном этапе, номенклатуры и требуемых значений рассчитываемых показателей надежности (ПН);
- выбор метода расчета, адекватного особенностям объекта, целям расчета, наличию необходимой информации об объекте и исходных данных для расчета;
- составление расчетных моделей для каждого показателя надежности;
- получение и предварительная обработка исходных данных для расчета, вычисление значений показателей надежности объекта и, при необходимости, их сопоставление с требуемыми;
- оформление, представление и защиту результатов расчета.

Основные методы, применяемые при расчете надежности, и их классификация представлены на рисунке 1.1.

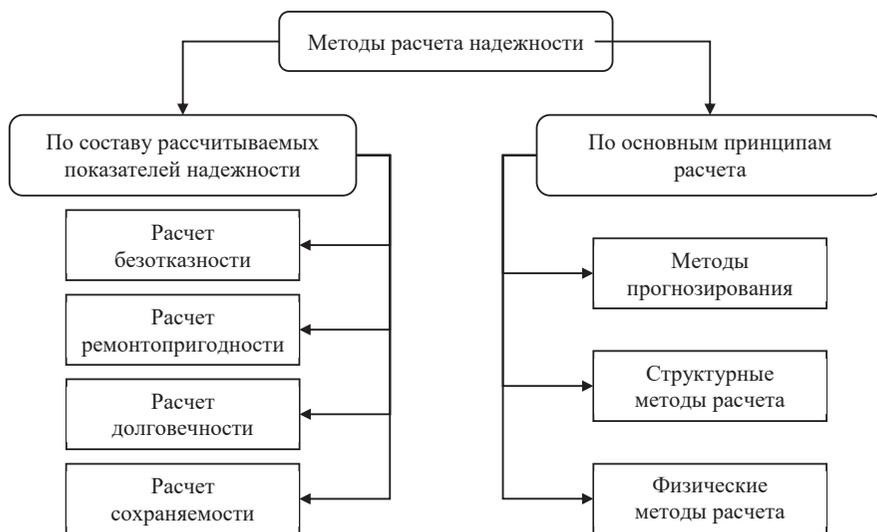


Рисунок 1.1 – Методы расчета надежности

Методы прогнозирования основаны на использовании для оценки ожидаемого уровня надежности объекта данных о достигнутых значениях и выявленных тенденциях изменения ПН объектов, аналогичных или близких к рассматриваемому по назначению, принципам действия, схемно-конструктивному построению и технологии изготовления, элементной базе и

применяемым материалам, условиям и режимам эксплуатации, принципам и методам управления надежностью (далее – объектов-аналогов).

Структурные методы расчета основаны на представлении объекта в виде логической (структурно-функциональной) схемы, описывающей зависимость состояний и переходов объекта от состояний и переходов его элементов с учетом их взаимодействия и выполняемых ими функций в объекте с последующими описаниями построенной структурной модели адекватной математической моделью и вычислением ПН объекта по известным характеристикам надежности его элементов.

Физические методы расчета основаны на применении математических моделей, описывающих физические, химические и иные процессы, приводящие к отказам объектов (к достижению объектами предельного состояния), и вычислении ПН по известным параметрам нагруженности объекта, характеристикам примененных в объекте веществ и материалов с учетом особенностей его конструкции и технологии изготовления.

Характеристика перечисленных методов и рекомендации по их применению приведены в ГОСТ 27.301-95 «Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения» (смотри приложение А данного пособия).

Исходными данными для расчета надежности объекта могут быть априорные данные о надежности объектов-аналогов, составных частей и комплектующих изделий рассматриваемого объекта по опыту их применения в аналогичных или близких условиях. Также исходными данными могут служить оценки ПН (параметры законов распределения характеристик надежности) составных частей объекта, полученные экспериментальным или расчетным способом непосредственно в процессе разработки (изготовления, эксплуатации) рассматриваемого объекта и его составных частей.

Источниками исходных данных для расчета надежности объекта могут быть:

- стандарты и технические условия на составные части объекта, применяемые в нем комплектующие элементы межотраслевого применения, вещества и материалы;
- справочники по надежности элементов, свойствам веществ и материалов, нормативам продолжительности (трудоемкости, стоимости) типовых операций ТО и ремонта и другие информационные материалы;
- статистические данные (банки данных) о надежности объектов-аналогов, входящих в их состав элементов, свойствах применяемых в них веществ и материалов, о параметрах операций ТО и ремонта, собранные в процессе их разработки, изготовления, испытаний и эксплуатации;
- результаты прочностных, электрических, тепловых и иных расчетов объекта и его составных частей, включая расчеты показателей надежности составных частей объекта.

Степень адекватности моделей и методов расчета надежности оценивают путем сопоставления результатов расчета и экспериментальной оценки ПН объектов-аналогов, для которых применялись аналогичные модели

и методы расчета; исследования чувствительности моделей к возможным нарушениям принятых при их построении допущений и предположений, а также к погрешностям исходных данных для расчета; экспертизы и апробации применяемых моделей и методов, проводимых в установленном порядке.

2. Обоснование требований к надежности проектируемой системы и разрабатываемого устройства

2.1 Постановка задачи

При выполнении курсового или дипломного проектирования разрабатывается, как правило, конкретное радиоэлектронное устройство, входящее в состав системы. Одним из основных свойств такой системы и разрабатываемого устройства является надежность. Это свойство радиоэлектронных систем оказывает существенное влияние как на готовность транспортного радиооборудования к применению, так и на эффективность его использования. В зависимости от назначения аппаратуры и условий её эксплуатации надежность конкретной радиоэлектронной системы может включать безотказность, ремонтпригодность, сохраняемость, долговечность или сочетание этих свойств. ГОСТ Р 27.102-2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения» дает следующие определения:

- **безотказность:** свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения;
- **ремонтпригодность:** свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособности объекта путем технического обслуживания и ремонта;
- **долговечность:** свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта;
- **сохраняемость:** свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Применительно к РО воздушного транспорта (ВТ), наиболее характерным на этапе проектирования является определение требований к двум свойствам – **безотказности** и **ремонтпригодности**. Для наземных радиоэлектронных систем ВТ также могут задаваться требования по **долговечности** и **сохраняемости**.

Требования по надежности – это требования, установленные в нормативных документах (НД), к количественным значениям показателей, характеризующих такие свойства объекта, как безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость, определяющие надежность объекта в целом [2].

Номенклатуру задаваемых ПН объекта выбирают в соответствии с [2]. Количество задаваемых ПН (номенклатура ПН) для объекта должно быть оптимальным. С точки зрения затрат на проверку, подтверждение и оценку

заданных ПН при изготовлении и в эксплуатации их число должно быть минимальным. В то же время число заданных ПН должно максимально характеризовать надежность объекта на всех этапах его производства и эксплуатации. В целях оптимизации количества задаваемых ПН, особенно для сложных восстанавливаемых объектов, используют **комплексные показатели надежности**.

Для изделий, подлежащих перед началом или в процессе эксплуатации хранению (транспортированию), задают показатели сохраняемости. При этом должны быть определены и учтены условия и режимы хранения (транспортирования), применительно к которым задают указанные показатели.

Общий принцип выбора рациональной (минимально необходимой и достаточной) номенклатуры задаваемых ПН состоит в том, что в каждом конкретном случае объект классифицируют последовательно по установленным признакам, характеризующим его назначение, особенности схемно-конструктивного построения и заданные (предполагаемые) условия эксплуатации. В зависимости от совокупности классификационных группировок, к которым он отнесен, по рабочим таблицам, приведенным в [2] определяют набор показателей, подлежащих заданию.

Рассмотрим выбор показателей безотказности и ремонтпригодности на примере автоматического радиокompаса (АРК).

Данная система относится к объектам **конкретного назначения**, т.е. имеющие один основной вариант применения по назначению. Также бывают объекты общего назначения, имеющие несколько вариантов применения.

По режиму применения (функционалирования) АРК относится к объектам **непрерывного длительного применения**, у которых наработка равна времени пребывания объекта во включенном состоянии.

По возможности восстановления и обслуживания радиокompас относится к **восстанавливаемым обслуживаемым** устройствам.

Тогда, согласно таблице Б.1 из [2], в качестве показателей безотказности и ремонтпригодности, а также комплексных показателей надежности устанавливают:

- коэффициент технического использования $K_{m,u}$ или коэффициент готовности K_g . Коэффициент готовности задают для изделий, выполняющих ответственные функции, в противном случае задают $K_{m,u}$;
- средняя наработка на отказ T_0 и среднее время восстановления $T_в$. Причем среднее время восстановления задают дополнительно к K_g или $K_{m,u}$ при наличии ограничений на продолжительность восстановления.

2.2 Содержание расчетов

Требования, предъявляемые к безотказности РО ВТ, различны для систем различного функционального назначения. В НД устанавливаются

требования к безотказности таких систем различного назначения в виде величин средней наработки на отказ в полете $\bar{T}_{\text{оп}}$ и налета \bar{T}_c на неисправность, проявившуюся как при технической эксплуатации, так и в полете. Выберем для проектируемой системы величину T_c и будем полагать

$$\bar{T}_{c \text{ зад}} = \bar{T}_c.$$

Эта величина является исходной для обоснования требований к безотказности разрабатываемого устройства, т.е. определения величины $\bar{T}_{y \text{ зад}}$. Методика обоснования величины $\bar{T}_{y \text{ зад}}$ основывается на распределении требований по безотказности между устройствами системы. При этом учитывается относительная сложность составных частей системы, чтобы предъявить равные требования к одинаковым по сложности устройствам системы и менее высокие требования к более сложным устройствам. При распределении требований к безотказности между отдельными устройствами будем исходить из того, что задана вероятность $R_{c \text{ зад}}(\tau)$ безотказной работы системы в течение интервала времени τ .

Действительно, требования к безотказности в виде среднего времени безотказной работы или вероятности безотказной работы являются идентичными вследствие существования однозначной зависимости (при известном выражении для $R_{c \text{ зад}}(\tau)$):

$$\bar{T}_{c \text{ зад}} = \int_0^{\infty} R_{c \text{ зад}}(t) dt. \quad (2.1)$$

Для нерезервированной системы с последовательным в смысле надежности соединением составных частей и экспоненциальным законом распределения времени безотказной работы справедлива формула

$$R_{c \text{ зад}}(\tau) = \exp\left(-\frac{\tau}{T_{c \text{ зад}}}\right). \quad (2.2)$$

При решении задачи обоснования требований к безотказности разрабатываемого устройства возможны два варианта:

- в эксплуатации имеется аналог проектируемой системы;
- аналога проектируемой системы нет в эксплуатации.

В первом случае предполагается, что по результатам эксплуатации известны значения вероятности безотказной работы системы-аналога $R_a(\tau)$ и каждого j -го устройства $R_{aj}(\tau)$, входящего в состав системы. Тогда, зная требования к проектируемой системе $R_{c \text{ зад}}(\tau)$, можно определить степень уменьшения вероятности отказа для проектируемой системы по сравнению с системой-аналогом при помощи коэффициента

$$K = \frac{1 - R_a(\tau)}{1 - R_{c \text{ зад}}(\tau)}. \quad (2.3)$$

Потребовав соблюдение одинаковых значений K для всех устройств, можно записать

$$K = \frac{1 - R_{aj}(\tau)}{1 - R_{y \text{ зад}}(\tau)}. \quad (2.4)$$

Тогда требования к безотказности разрабатываемого устройства определяются из соотношения

$$R_{y \text{ зад}}(\tau) = 1 - \frac{1 - R_{aj}(\tau)}{K}. \quad (2.5)$$

Во втором случае, когда для проектируемой системы не существует аналога, можно сформировать искусственный аналог. Для этого необходимо приближенно рассчитать показатели безотказности каждого устройства системы, используя формулу

$$R_{aj}(\tau) = \exp\left(-\frac{L_j \tau}{2,5 \cdot 10^3}\right). \quad (2.6)$$

где L_j – количество каскадов в j -м устройстве; $2,5 \cdot 10^3$ – эмпирический коэффициент, учитывающий условия эксплуатации РО.

Определив таким образом показатели безотказности для всех устройств, можно оценить $R_a(\tau)$ с помощью соотношения

$$R_a(\tau) = \prod_j R_{aj}(\tau). \quad (2.7)$$

Далее такую систему можно использовать в качестве аналога.

Зная $R_{y \text{ зад}}(\tau)$, можно задать требования к безотказности устройства в виде значения среднего времени наработки на отказ $\bar{T}_{y \text{ зад}}$. Предполагая, что время до отказа подчинено экспоненциальному закону, получим:

$$R_{y \text{ зад}}(\tau) = \exp\left(-\frac{\tau}{\bar{T}_{y \text{ зад}}}\right);$$

$$\ln[R_{y \text{ зад}}(\tau)] = -\frac{\tau}{\bar{T}_{y \text{ зад}}};$$

$$\bar{T}_{y \text{ зад}} = -\frac{\tau}{\ln[R_{y \text{ зад}}(\tau)]}.$$

С учетом того, что требования к безотказности разрабатываемому устройству, как правило, достаточно высоки, можно воспользоваться соотношением

$$R_{y \text{ зад}}(\tau) = \exp\left(-\frac{\tau}{\bar{T}_{y \text{ зад}}}\right) \approx 1 - \frac{\tau}{\bar{T}_{y \text{ зад}}}.$$

Отсюда

$$\bar{T}_{y \text{ зад}} = \frac{\tau}{1 - R_{y \text{ зад}}(\tau)}. \quad (2.8).$$

Наряду с безотказностью важным свойством РО ВТ является ремонтпригодность. Требуемый уровень ремонтпригодности задается в НД, как правило, в виде среднего времени восстановления \bar{T}_B . Примем, что отказавшие системы восстанавливаются независимо друг от друга. Тогда величина \bar{T}_B определяет требования к ремонтпригодности как проектируемой системы в целом, так и разрабатываемого устройства. Поэтому можно принять:

$$\bar{T}_{c \text{ зад}}^B = \bar{T}_{y \text{ зад}}^B = \bar{T}_B. \quad (2.9)$$

Методику обоснования требований к надежности можно представить в виде следующего алгоритма:

1. Определить, к какому классу принадлежит проектируемая система. Это относится как к бортовому РО, так и к наземному РО ВТ.

2. Определить требуемую для проектируемой системы наработку на неисправность, проявившуюся в полете и при технической эксплуатации («на земле») \bar{T}_c . Принять $\bar{T}_{c \text{ зад}} = \bar{T}_c$.

3. Определить величину τ – интервал времени для задания вероятности безотказной работы. Для бортового РО этот интервал будет равен максимальной продолжительности полета воздушного судна (ВС).

4. Используя соотношение (2.2), найти значение $R_{c \text{ зад}}(\tau)$.

5. Определить, имеется ли в эксплуатации система-аналог проектируемой системы. Если такой аналог есть, то необходимо перейти сразу к выполнению п.8. В противном случае выполнять п.6.

6. Рассчитать для каждого j -го устройства по формуле (2.6) величины $R_{aj}(\tau)$.

7. Оценить вероятность безотказной работы системы-аналога по формуле (2.7). Далее необходимо перейти к выполнению п.9.

8. Определить из опыта эксплуатации системы-аналога величины $R_a(\tau)$ и $R_{ay}(\tau)$.

9. По формуле (2.3) определить коэффициент K .

10. Определить требования к безотказности разрабатываемого устройства из соотношения (2.5).

11. Найти заданное значение среднего времени безотказной работы разрабатываемого устройства $\bar{T}_{y \text{ зад}}$ по формуле (2.8).

12. По НД определить среднее время восстановления ВС, для которого проектируется система.

13. Определить $\bar{T}_{c \text{ зад}}^B$ и $\bar{T}_{y \text{ зад}}^B$ из соотношения (2.9).

3. Расчет надежности проектируемой системы и разрабатываемого устройства

3.1 Постановка задачи

Расчет надежности производится после разработки схем электрической структурной проектируемой системы и электрической принципиальной разрабатываемого устройства. Этот расчет включает определение показателей безотказности разрабатываемого устройства, оценку показателей безотказности проектируемой системы и оценку показателей ремонтпригодности разрабатываемого устройства.

Задача состоит в том, чтобы:

- по известным характеристикам безотказности элементов и схеме соединения функциональных узлов устройства по надежности определить среднее время безотказной работы \bar{T}_y и вероятность безотказной работы $R_y(\tau)$ разрабатываемого устройства;
- сравнить \bar{T}_y с величиной $\bar{T}_{y\text{зад}}$ и сделать заключение об удовлетворении предъявленных к устройству требований по безотказности;
- при удовлетворении требований по безотказности устройства оценить характеристики безотказности $R_c(\tau)$ и \bar{T}_c проектируемой системы;
- по известным показателям ремонтпригодности элементов оценить среднее время восстановления \bar{T}_y^B разрабатываемого устройства (для восстанавливаемых устройств);
- найти требуемое количество устройств в запасном имуществе (для невосстанавливаемых устройств);
- сравнить \bar{T}_c^B с величиной $\bar{T}_{c\text{зад}}^B$ и сделать заключение об удовлетворении предъявленных к системе требований по ремонтпригодности.

3.2 Содержание расчетов

3.2.1 Расчет показателей безотказности проектируемого устройства

Расчет показателей безотказности проектируемого устройства состоит из трех этапов. На первом этапе определяется схема соединения по надежности функциональных узлов, составляющих устройство. На втором этапе осуществляется расчет показателей безотказности каждого из функциональных узлов, входящих в схему устройства. Третий этап содержит расчет показателей безотказности проектируемого устройства по известным показателям безотказности функциональных узлов и схеме соединения этих узлов по надежности.

На начальном этапе проектирования разрабатываемое устройство не содержит, как правило, резервных функциональных узлов. Если при этом можно полагать, что отказ любого функционального узла приводит к отказу устройства, то схема соединения этих узлов по надежности представляет собой последовательное соединение. В ряде случаев применение резервных функциональных узлов предусматривается заданием на проектирование.

Тогда в схеме соединения функциональных узлов по надежности появляются участки с параллельно включенными функциональными узлами.

Рассмотрим более подробно расчет показателей безотказности функционального узла. Будем при этом использовать следующие допущения:

- закон распределения времени безотказной работы каждого i -го элемента схемы электрической принципиальной является экспоненциальным с параметром (интенсивностью отказа) λ_i ;
- отказ любого из элементов функционального узла приводит к отказу этого узла, т.е. элементы в составе функционального узла соединены в смысле надежности последовательно.

Из указанных предположений следует, что вероятность безотказной работы j -го функционального узла за время τ равна:

$$R_j^{\text{фy}}(\tau) = \prod_{i \in V_j} R_i(\tau) = \prod_{i \in V_j} \exp(-\lambda_i \tau), \quad (3.1)$$

где $R_i(\tau)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента схемы электрической принципиальной за время τ ; V_j – множество элементов, входящих в состав j -го функционального узла.

Соотношение (3.1) можно представить в виде:

$$R_j^{\text{фy}}(\tau) = \exp\left(-\sum_{i \in V_j} \lambda_i \tau\right) = \exp(-\lambda_j^{\text{фy}} \tau), \quad (3.2)$$

где $\lambda_j^{\text{фy}}$ – интенсивность отказов j -го функционального узла.

Как правило, в большинстве справочников значение интенсивностей отказов электронных и радиоизделий (ЭРИ) указано по результатам испытаний, проведенным в нормальных условиях, не учитывающие реальные условия эксплуатации. При расчете безотказности функциональных узлов, и устройства в целом, необходимо использовать значения так называемой эксплуатационной интенсивности отказов, т.е. интенсивности, учитывающей предполагаемые условия эксплуатации разрабатываемого устройства.

Для расчета эксплуатационной интенсивности отказов используется следующая модель:

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б}} \prod_{i=1}^m K_i. \quad (3.3)$$

где $\lambda_{\text{б}}$ – базовая интенсивность отказов рассматриваемого элемента; K_i – коэффициент, учитывающий изменение эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от i -го фактора; m – число учитываемых факторов.

Надо отметить, что количество учитываемых факторов, в общем случае, можно разделить на две группы: общие для всех видов ЭРИ и характерные для того или иного типа ЭРИ. Примером второй группы может быть коэффициент,

зависящий от значения номинальной емкости конденсатора, или коэффициент, зависящий от значения допуска для сопротивлений.

При расчете безотказности РО ВТ учитываются следующие факторы и соответствующие им коэффициенты:

- коэффициент влияния вибраций $K_{\text{вибр}}$;
- коэффициент влияния ударных нагрузок $K_{\text{ун}}$. Для стационарной аппаратуры $K_{\text{вибр}} = K_{\text{ун}} = 1$;
- коэффициент электрической нагрузки $K_{\text{н}}$. Значение этого коэффициента для резисторов, микросхем, транзисторов и диодов $K_{\text{н}} = 1,5$, для конденсаторов $K_{\text{н}} = 3,0$;
- коэффициент влияния влажности и температуры K_{th} . Для влажности 90...98% при $t=30...40^{\circ}\text{C}$ $K_{\text{th}} = 2,5$;
- коэффициент влияния давления воздуха K_p (при давлении 61кПа – $K_p = 1,14$);
- коэффициент, зависящий от температуры поверхности элемента K_t .

Если нагрузка составляет 1/10 от максимальной, то $K_{\text{н}} = 1,0$ для всех типов элементов.

Значения λ_B для различных типов ЭРИ приведены в таблице Б.1 приложения Б данного пособия.

В некоторых справочных данных приводятся значения интенсивностей отказов для элементов различных типов, полученные из опыта эксплуатации или определенные по результатам испытаний в реальных условиях эксплуатации. При использовании этих данных поправочные коэффициенты в (3.3) не учитываются.

Из соотношения (3.2) следует, что интенсивность отказов j -го функционального узла определяется в виде суммы

$$\lambda_j^{\text{фy}} = \sum_{i \in V_j} \lambda_i, \quad (3.4)$$

Для удобства вычислений и возможности выявления наиболее ненадежных элементов схемы электрической принципиальной разрабатываемого устройства целесообразно результаты расчетов величия $\lambda_j^{\text{фy}}$ свести в таблицу 3.1.

Значения этой таблицы определяются следующим образом. Все элементы функционального узла необходимо разбить на группы однотипных элементов. Для элементов каждой из этих групп будут одинаковыми значения интенсивностей отказов λ_B^i и поправочные коэффициенты. Элементы заносятся в графу 2 таблицы, а в графе 3 указывается их обозначение в принципиальной схеме. Эти данные позволяют, во-первых, контролировать записи в таблице, чтобы одни и те же элементы не были учтены дважды или не учтены вовсе и, во-вторых, наглядно увидеть наиболее надежные элементы или группы элементов. В графе 4 таблицы отмечается количество N элементов

рассматриваемого типа. Данные для заполнения графы 5 определяются из справочных данных. Графы 6-11 заполняются в соответствии с типом элементов, уровнем их нагрузки в принципиальной схеме и предполагаемыми условиями эксплуатации. После этого определяется произведение и результат, умноженный для удобства записей на 10^{-5} , заносится в графу 12. Затем определяется интенсивность отказов для всей группы элементов данного типа в виде произведения, а результат заносится в графу 13.

Таблица 3.1 – Расчет интенсивности отказов функциональных узлов

№пп	Наименование и типы элементов	Обозначение по принципиальной схеме	Количество элементов данного типа (N)	$\lambda_B^i \times 10^{-5}, 1/ч$	$K_{\text{вибр}}$	$K_{\text{ун}}$	$K_{\text{н}}$	$K_{\text{тн}}$	K_p	K_t	$\lambda_i = \lambda_B^i K_{\text{вибр}} K_{\text{ун}} K_{\text{н}} K_{\text{тн}} K_p K_t \times 10^{-5}, 1/ч$	$\lambda_i \cdot N \times 10^{-5}, 1/ч$	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Функциональный узел 1													
1													$\lambda_1^{\text{ф}} =$
2													
3													
Функциональный узел 2													
1													$\lambda_2^{\text{ф}} =$
2													
3													

Необходимо заметить, что при расчете безотказности разрабатываемого устройства следует учитывать не только безотказность ЭРИ, но и паяных соединений, разъемов, коаксиальных соединений и т.п.

После того, как в таблицу внесены данные обо всех элементах принципиальной схемы рассматриваемого j -го функционального узла, необходимо просуммировать значения, записанные в графе 13. В результате суммирования будет получена величина $\lambda_j^{\text{ф}}$. Такие циклы вычислений необходимо провести для всех функциональных узлов разрабатываемого устройства.

Следующим этапом расчета показателей безотказности разрабатываемого устройства является определение среднего времени безотказной работы по известной схеме соединения функциональных узлов по надежности и вычисленным значениям $\lambda_j^{\text{ф}}$. Алгоритм этих вычислений

определяется схемой соединения функциональных узлов по надежности, определенной на первом этапе.

В том случае, когда эта схема является последовательным соединением, т.е. отказ любого из функциональных узлов приводит к отказу устройства, вероятность безотказной работы устройства определяется соотношением

$$R_y(\tau) = \prod_{j=1}^J R_j^{\text{фв}}(\tau), \quad (3.5)$$

где J – количество функциональных узлов в разрабатываемом устройстве.

Подставляя в (3.5) соотношение (3.2), получаем:

$$R_y(\tau) = \prod_{j=1}^J \exp(-\lambda_j^{\text{фв}} \tau) = \exp\left(-\sum_{j=1}^J \lambda_j^{\text{фв}} \tau\right). \quad (3.6)$$

Обозначив для этого случая

$$\sum_{j=1}^J \lambda_j^{\text{фв}} = \lambda_y, \quad (3.7)$$

получим

$$R_y(\tau) = \exp(-\lambda_y \tau). \quad (3.8)$$

Для определения среднего времени безотказной работы разрабатываемого устройства воспользуемся соотношением

$$\bar{T}_y = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt, \quad (3.9)$$

где $f(t)$ – плотность вероятности времени безотказной работы.

С учетом того, что

$$f(t) = -\frac{dR_y(t)}{dt},$$

выражение (3.9) примет вид

$$\bar{T}_y = -\int_0^{\infty} t \cdot \frac{dR_y(t)}{dt} dt = -\int_0^{\infty} t \cdot dR_y(t). \quad (3.10)$$

Проинтегрируем (3.10) по частям и учтем, что

$$R_y(0) = 1; \quad \lim_{t \rightarrow \infty} t \cdot R_y(t) = 0.$$

Тогда

$$\bar{T}_y = \int_0^{\infty} R_y(t) dt. \quad (3.11)$$

Подставляя в (3.11) соотношение (3.6), получаем

$$\bar{T}_y = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda_y t) dt = -\frac{1}{\lambda_y} \exp(-\lambda_y t) \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda_y}, \quad (3.12)$$

а с учетом (3.7) можем записать

$$\bar{T}_y = \frac{1}{\sum_{j=1}^J \lambda_j^{\phi y}}. \quad (3.13)$$

В том случае, когда схема устройства содержит резервные функциональные узлы (рис. 3.1), каждый такой участок представляет собой параллельное соединение функциональных узлов в смысле надежности.

Пусть, например, s -й функциональный узел имеет p_s -кратное резервирование. Под кратностью резервирования (резерва) понимается отношение числа резервных элементов к числу основных элементов, выраженное несокращенной дробью [3]. Тогда вероятность безотказной работы такого участка схемы может быть определена из соотношения

$$R_s(\tau) = 1 - [1 - R_s^{\phi y}(\tau)]^{p_s + 1}. \quad (3.14)$$

Пусть схема устройства содержит J последовательно в смысле надежности соединенных функциональных узлов, S из которых ($S \leq J$) имеют резерв. Будем для определенности полагать, что эти узлы имеют номера с $J-S$ до J . Введем величину p_j , обозначающую кратность резервирования j -го функционального узла.

Будем для определенности полагать, что эти узлы имеют номера с $J-S$ до J . Введем величину p_j , обозначающую кратность резервирования j -го функционального узла. Каждый участок схемы из $p_s + 1$ параллельно включенных функциональных узлов можно представить в виде одного обобщенного функционального узла с вероятностью безотказной работы, определяемой соотношением (3.14). В этом случае схема соединения по надежности функциональных узлов разрабатываемого устройства представляет собой последовательное соединение $J-S$ нерезервированных функциональных узлов и S резервированных функциональных узлов. Тогда вероятность безотказной работы разрабатываемого устройства выразится соотношением для $S \geq 1$

$$R_y(\tau) = \prod_{j=1}^{J-S} R_j^{\phi y}(\tau) \cdot \prod_{s=1}^S R_s(\tau), \quad (3.15)$$

для $S=0$, $\prod_{j=1}^S R_s(\tau) = 1$.

С учетом (3.14) можно записать

$$R_y(\tau) = \prod_{j=1}^{J-S} R_j^{\phi y}(\tau) \cdot \prod_{j=J-S+1}^J \left\{ 1 - [1 - R_j^{\phi y}(\tau)]^{p_j+1} \right\}. \quad (3.16)$$

Подставим теперь в (3.16) выражение (3.2). Тогда для $S \geq I$

$$R_y(\tau) = \exp\left(-\sum_{j=1}^{J-S} \lambda_j^{\phi y} \tau\right) \cdot \prod_{j=J-S+1}^J \left\{ 1 - [1 - \exp(-\lambda_j^{\phi y} \tau)]^{p_j+1} \right\}, \quad (3.17)$$

для $S=I$ произведение обращается в единицу.

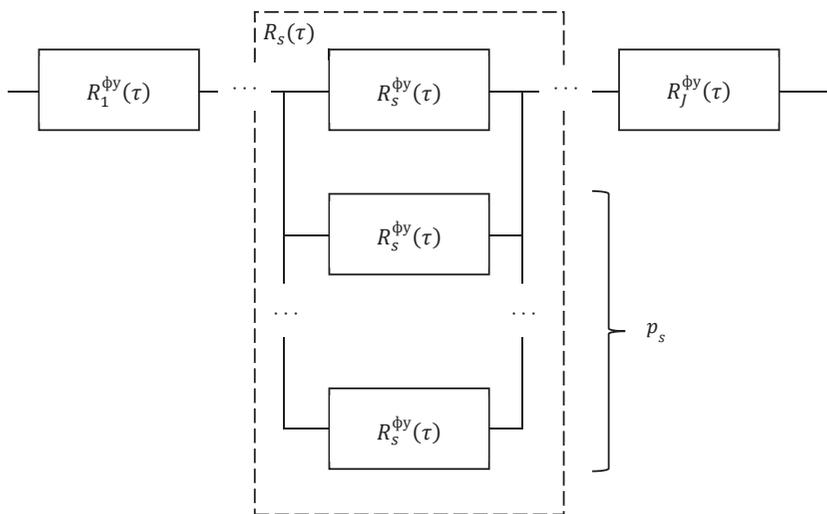


Рисунок 3.1 – Пример схемы по надежности при наличии резервированных функциональных узлов

Среднее время безотказной работы устройства согласно (3.11) для $S \geq I$ определится из соотношения

$$\bar{T}_y(\tau) = \int_0^{\infty} \exp\left(-\sum_{j=1}^{J-S} \lambda_j^{\phi y} \tau\right) \cdot \prod_{j=J-S+1}^J \left\{ 1 - [1 - \exp(-\lambda_j^{\phi y} \tau)]^{p_j+1} \right\} d\tau \quad (3.18)$$

для $S=I$ произведение обращается в единицу.

Если ни один из функциональных узлов не резервируется, то $p_j=0$ для всех $j=I, \dots, J$ и формула (3.16) приобретает вид (3.5), (3.17) отождествляется с (3.6), а (3.18) – с (3.12).

При так называемом «холодном» (ненагруженном) резервировании расчет безотказности производится по другим выражениям. Напомним, что «холодным» резервированием называется такой тип резервирования, при котором резервные элементы подключаются в работу только после отказа основного элемента. Таким образом, в каждый момент времени работает

только один элемент. При этом, резервные элементы, находясь в неподключенном состоянии.

Вероятность безотказной работы системы с ненагруженным резервом определяется формулой при равной интенсивности отказов λ каждого элемента (системы):

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda t)^i}{i!}. \quad (3.19)$$

Среднее время безотказной работы системы с ненагруженным резервом определяется по формуле:

$$T_1 = \frac{m+1}{\lambda}. \quad (3.20)$$

Интенсивность отказов $\lambda_c(t)$ системы с ненагруженным резервом:

$$\lambda_c(t) = \frac{\lambda^{m+1} t^m}{m! \sum_{i=0}^m \frac{\lambda t^i}{i!}}. \quad (3.21)$$

Может применяться для сокращения времени подключения резервных элементов так называемое «теплое» резервирование. Под «теплым» резервированием понимают такой тип резервирования, при котором резервные элементы также подключаются в работу только после отказа основного элемента. Однако, резервные элементы, находясь в состоянии облегченного резерва, могут отказать, но с гораздо меньшей вероятностью, чем основной элемент.

Вероятность безотказной работы системы с «теплым» резервом определяется формулой по следующей форме:

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = e^{-\lambda t} \left(1 + \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{i!} (1 - e^{-\lambda_p t})^i \right), \quad (3.22)$$

где λ – интенсивность отказов элементов в режиме полной нагрузки, λ_p – интенсивность отказов элементов в состоянии резерва, m – количество резервных элементов, а коэффициент a_i рассчитывается по формуле

$$a_i = \prod_{j=0}^{i-1} \left(j + \frac{\lambda}{\lambda_p} \right). \quad (3.23)$$

Среднее время наработки до отказа:

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=0}^m \frac{1}{1 + i \frac{\lambda_p}{\lambda}}.$$

В тех случаях, когда элементы в «холодном» или «теплом» резервах не являются равнонадежными, или же когда времена их отказов не подчиняются экспоненциальному закону, необходимо использовать другие методы расчета: метод состояний либо имитационное моделирование.

3.2.2 Рекомендации по повышению безотказности разрабатываемого устройства

В случае несоответствия расчетных показателей безотказности заданным требованиям необходимо принять меры для повышения безотказности проектируемого устройства. Среди методов, которые могут использоваться для повышения безотказности на этапе проектирования можно выделить следующие:

- выбор элементов с меньшими значениями интенсивностей отказов;
- снижение коэффициентов нагрузки элементов принципиальной схемы;
- применение резервирования.

Решение вопроса о применении того или иного метода следует начинать с анализа расчетной таблицы 3.1. Анализируя данные, приведенные в таблице, необходимо выделить группы элементов с наибольшими значениями интенсивностей отказов и попытаться заменить их на более надежные. Этот метод повышения безотказности проектируемого устройства особенно эффективен, когда количество элементов, заменяемых на более надежные, достаточно велико.

Снижение нагрузки элементов схемы электрической принципиальной целесообразно применять для отдельных элементов, так как этот путь может быть связан со значительным изменением схемы, введением новых элементов и производством большого объема дополнительных расчетов.

Для бортового РО необходимо рассмотреть возможность снижения коэффициентов, учитывающих влияние вибрации и ударных нагрузок. Например, за счет ввода в конструкцию амортизационных рам.

Применение структурного резервирования является крайней мерой и может быть использовано, когда применение других методов повышения безотказности не дало желаемого эффекта. Это обусловлено тем, что введение резервных элементов влечет за собой усложнение схемы, увеличение массы и габаритов конструкций, потребляемой энергии. Кроме того, применение в ряде случаев резервирования замещением (холодного резерва) требует разработки сложных переключающих устройств. При этом безотказность всей группы резервных устройств вместе с переключателем должна быть выше безотказности нерезервированного устройства. Другими словами, участок схемы после применения резервирования должен быть более надежным, чем без применения резерва, и удовлетворять предъявленным требованиям по безотказности.

Для радиоэлектронных систем резервирование применяют, как правило, в масштабах устройства (блока). При применении резервирования возникает вопрос о том, какой должна быть безотказность переключающего устройства. Рассмотрим возможные схемы включения переключающего устройства при введении резервирования проектируемого устройства в целом.

На рисунке 3.2 приведена одна из возможных схем соединения по надежности. Такая схема означает, что при отказе переключающего

устройства не будет включаться в работу резервное устройство. Вероятность безотказной работы схемы определится из выражения

$$R_{p1}(\tau) = 1 - (1 - R_y(\tau))(1 - R_n(\tau)R_y(\tau)) = R_y(\tau) + R_n(\tau)R_y(\tau) - R_n(\tau)R_y^2(\tau). \quad (3.24)$$

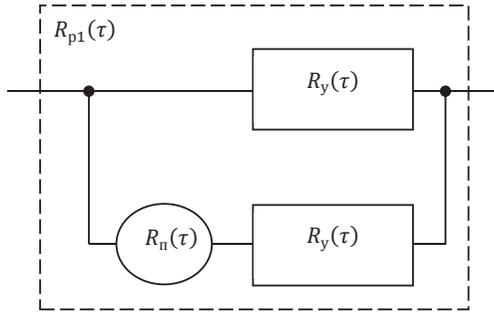


Рисунок 3.2 – Схема соединения по надежности при резервировании замещением, вариант 1

Согласно предъявленным требованиям к безотказности устройства должно выполняться неравенство

$$R_{p1}(\tau) \geq R_{y \text{ зад}}(\tau). \quad (3.25)$$

Неравенство будет выполняться, если вероятность безотказной работы переключающего устройства составит

$$R_n(\tau) \geq \frac{R_{y \text{ зад}}(\tau) - R_y(\tau)}{R_y(\tau)(1 - R_y(\tau))}. \quad (3.26)$$

К этому нужно еще добавить естественное ограничение

$$R_n(\tau) \leq 1. \quad (3.27)$$

Система неравенств (3.21)...(3.22) имеет решение не при всех значениях $R_y(\tau)$ и $R_{y \text{ зад}}(\tau)$. Это говорит о том, что не всегда за счет однократного резервирования можно так увеличить безотказность устройства, чтобы она была не меньше заданной. Необходимым условием существования решения системы (3.21)...(3.22) является

$$\frac{R_{y \text{ зад}}(\tau) - R_y(\tau)}{R_y(\tau)(1 - R_y(\tau))} < 1.$$

Отсюда

$$R_y(\tau)(2 - R_y(\tau)) > R_{y \text{ зад}}(\tau). \quad (3.28)$$

Таким образом, лишь в том случае, когда выполняется неравенство (3.23), применение схемы (рис. 3.2) позволяет достичь заданного уровня безотказности. При этом вероятность безотказной работы резервированного устройства удовлетворяет заданным требованиям, если безотказность переключающего устройства удовлетворяет (3.21).

Другая из возможных схем включения переключающего устройства приведена на рисунке 3.3.

Эта схема соединения по надежности означает, что основное и резервное устройство функционируют только при функционировании переключателя. Для этой схемы

$$R_n(\tau) \cdot \left[1 - (1 - R_y(\tau))^2 \right] \geq R_{y_{\text{зад}}}(\tau). \quad (3.29)$$

Отсюда решение можно выразить, при выполнении условия (3.23), в виде

$$1 \geq R_n(\tau) \geq \frac{R_{y_{\text{зад}}}(\tau)}{R_y(\tau)(2 - R_y(\tau))}. \quad (3.30)$$

Таким образом, при применении резервирования проектируемого устройства необходимо поступить следующим образом. Прежде всего по известным значениям $R_y(\tau)$ и $R_{y_{\text{зад}}}(\tau)$ следует проверить выполнение неравенства (3.23). Если это неравенство выполняется, то за счет применения однократного резервирования возможно повышение безотказности разрабатываемого устройства до заданного уровня. Затем выбирается схема включения переключающего устройства и, в зависимости от выбранной схемы, определяются требования к переключающему устройству в виде (3.21) или (3.25).

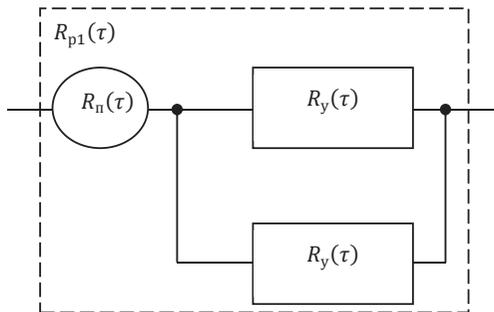


Рисунок 3.3 – Схема соединения по надежности при резервировании замещением вариант 2

Иногда целесообразно осуществлять резервирование наиболее ненадежных функциональных узлов внутри проектируемого устройства. В этом случае вероятность безотказной работы проектируемого устройства с резервированием должна быть больше заданной, т.е.

$$R_{ур}(\tau) \geq R_{у зад}(\tau).$$

3.2.3 Оценка показателей безотказности проектируемой системы

В том случае, когда рассчитанное значение \bar{T}_y превосходит $\bar{T}_{y зад}$, необходимо оценить безотказность проектируемой системы. Будем полагать, что степень повышения безотказности по сравнению с заданной одинакова как для разрабатываемого устройства, так и для проектируемой системы. Определим коэффициент

$$K_1 = \frac{1 - R_{у зад}(\tau)}{1 - R_y(\tau)}. \quad (3.31)$$

Тогда в соответствии с принятым предположением

$$\frac{1 - R_{с зад}(\tau)}{1 - R_c(\tau)} = K_1, \quad (3.32)$$

отсюда

$$R_c(\tau) = 1 - \frac{1 - R_{с зад}(\tau)}{K_1},$$

или

$$R_c(\tau) = 1 - \frac{1 - R_{с зад}(\tau)}{1 - R_{у зад}(\tau)} \cdot (1 - R_y(\tau)). \quad (3.33)$$

Предполагая, что время безотказной работы системы распределено по экспоненциальному закону, можно записать

$$R_c(\tau) = \exp\left(-\frac{\tau}{T_c}\right).$$

Используя результат вычисления (3.28), определим теперь среднее время безотказной работы для системы по формуле

$$\bar{T}_c = -\frac{\tau}{\ln R_c(\tau)}. \quad (3.34)$$

3.2.4 Оценка показателей ремонтпригодности

Для определения уровня ремонтпригодности разрабатываемого устройства необходимо определить среднее время восстановления.

Методика расчета этого показателя зависит от того, является разрабатываемое устройство восстанавливаемым или нет. Рассмотрим сначала случай восстанавливаемого устройства. В этом случае среднее время восстановления определяется порядком восстановления работоспособности устройства, поэтому оценку этого показателя необходимо проводить для

наиболее неблагоприятного с точки зрения готовности случая. Рассмотрим ситуацию, когда запасное исправное устройство (конструктивно-съемная единица) отсутствует в месте организации ремонта воздушного судна (ВС) (рис.3.4).

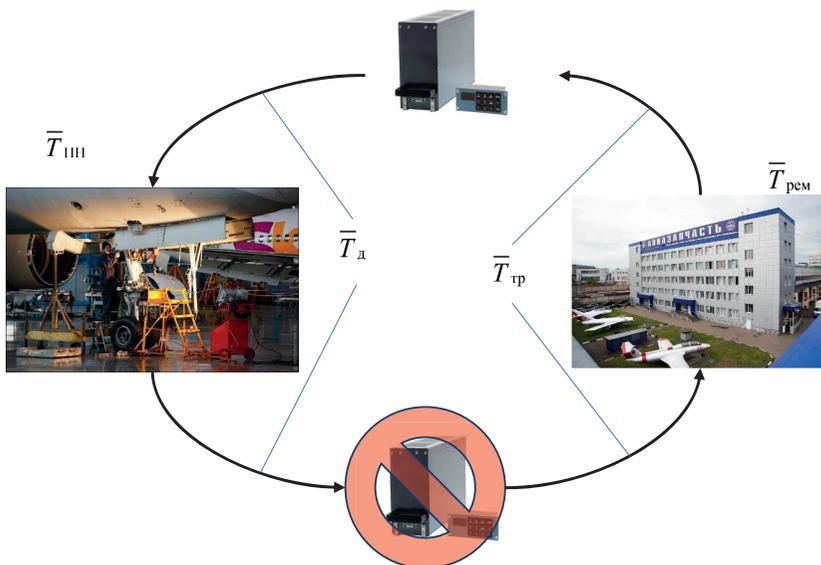


Рисунок 3.4 – Схема организации восстановления ВС

В этом случае отказавшее устройство демонтируется с ВС, транспортируется к месту ремонта (восстановления) отказавшего устройства (месту хранения запасных частей), восстанавливается и после этого вновь устанавливается на ВС. Тогда среднее время восстановления разрабатываемого устройства можно представить в виде:

$$\bar{T}_y^B = \bar{T}_{пн} + \bar{T}_{д} + \bar{T}_{тр} + \bar{T}_{рем},, \quad (3.35)$$

где $\bar{T}_{пн}$ – среднее время определения неисправности устройства (блока); $\bar{T}_{д}$ – среднее время, необходимое на демонтаж отказавшего устройства (блока) с ВС и установку исправного устройства на ВС; $\bar{T}_{тр}$ – среднее время транспортировки устройства по маршруту ВС – место хранения запасных частей – ВС; $\bar{T}_{рем}$ – среднее время, необходимое на поиск неисправного элемента, его замену и проверку работоспособности устройства.

Величина $\bar{T}_{д}$ зависит, в основном, от размещения устройства на летательном аппарате и его конструкции. Поэтому оценку этого показателя целесообразно проводить путем анализа данных, полученных при эксплуатации аналогичных устройств системы-аналога или устройств,

размещаемых аналогичным образом на летательном аппарате того же типа. При этом могут быть использованы данные, полученные при проведении практик.

Величина $\bar{T}_{тр}$ зависит от взаимного расположения зон рассредоточения ВС и места хранения запасных частей (ремонтной организации) в аэропорту и ориентировочно изменяется в пределах ((5...30) x 2) мин.

Для определения $\bar{T}_{рем}$ разделим условно разрабатываемое устройство на такие восстанавливаемые элементы, когда отказ любого из них приводит к отказу устройства. Если через $\bar{T}_{рем K}$ обозначить среднее время восстановления K -го из полученных элементов, а через Q_k – вероятность отказа устройства из-за отказа k -го элемента, то среднее время ремонта устройства можно определить в виде

$$\bar{T}_{рем} = \sum_{k=1}^N Q_k \bar{T}_{рем K}, \quad (3.36)$$

где N – количество элементов в проведенном разбиении. В частном случае, когда устройство отказывает при отказе любого из элементов $N=I$ (общему количеству элементов в системе).

Вероятность Q_k определяется по формуле:

$$Q_k = \frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^I \lambda_i}, \quad (3.37)$$

где λ_i определяются по результатам проведенного расчета показателей безотказности.

Для определения величины $\bar{T}_{рем K}$ можно использовать таблицу, приведенную в приложении В.

Конструктивно разрабатываемое устройство может быть выполнено таким образом, что его восстановление путем замены отдельных элементов в условиях эксплуатирующей организации невозможно, т.е. $N = 0$. В этом случае восстановление устройства может быть проведено лишь агрегатным методом, и при полной обеспеченности запасным имуществом соотношение (3.35) принимает вид:

$$\bar{T}_y^B = \bar{T}_{ПН} + \bar{T}_д \quad (3.38)$$

Однако в случае невозможности восстановления устройства возникает вопрос о необходимом количестве запасных устройств. Вероятность того, что не будет простоя из-за отсутствия запасных устройств, определяется вероятностью $P\{x \leq n\}$ того, что количество отказов устройств x не превысит количество запасных устройств n за время наработки t . Будем полагать, что поток отказов является пуассоновским и вероятность появления равно k отказов за время t определяется соотношением

$$p_k(t) = \frac{(\lambda_y \cdot A \cdot t)^k}{k!} \exp(-\lambda_y \cdot A \cdot t) \quad (3.39)$$

где A – количество летательных аппаратов в эксплуатирующей организации.
Тогда:

$$p\{x \leq n\} = \sum_{j=0}^n \frac{(\lambda_y \cdot A \cdot t)^j}{j!} \exp(-\lambda_y \cdot A \cdot t) \quad (3.40)$$

Для определения необходимого количества запасных устройств n необходимо задать уровень p вероятности $P\{x \leq n\}$. Далее, последовательно подставляя в (3.40) значения n , равные 1, 2 и т.д., нужно сравнивать полученные значения $P\{x \leq n\}$ с заданным уровнем. Искомым значением n будет наименьшее значение n , при котором выполняется условие

$$P\{x \leq n\} > p_{\text{зад}}. \quad (3.41)$$

3.2.5 Методика расчёта надёжности

1. На основании анализа схемы электрической структурной (или функциональной) разрабатываемого устройства построить схему соединения его функциональных узлов по надёжности.

2. Используя схему электрическую принципиальную разрабатываемого устройства, таблицу приложения Б и соотношения (3.3), (3.4), заполнить таблицу 3.1.

3. По формуле (3.17) рассчитать вероятность $R_y(\tau)$. Если схема соединения функциональных узлов устройства по надёжности представляет собой последовательное соединение, то для расчета вероятности $R_y(\tau)$ необходимо использовать Формулы (3.7) и (3.8).

4. По формуле (3.18) рассчитать среднее время безотказной работы T_y . Если схема соединения функциональных узлов устройства по надёжности представляет собой последовательное соединение, то для расчета величины T_y необходимо использовать формулу (3.13).

5. Сравнить рассчитанное значение T_y с заданным $T_{y\text{зад}}$. Если $T_y < T_{y\text{зад}}$, необходимо принять меры по повышению безотказности разрабатываемого устройства согласно рекомендациям п.3.2.2 и повторить расчеты по пп. 1...4 данной методики.

6. По формуле (3.28) оценить вероятность безотказной работы проектируемой системы $R_c(\tau)$.

7. По формуле (3.29) оценить среднее время безотказной работы системы T_c .

8. Если разрабатываемое устройство восстанавливаемое, вычислить с использованием формул (3.36), (3.37) и таблицы приложения В среднее время ремонта $\bar{T}_{\text{рем}}$ невосстанавливаемого устройства расчеты необходимо выполнять, начиная с п.10 настоящей методики.

9. Для восстанавливаемого устройства по формуле (3.35) оценить среднее время восстановления \bar{T}_y^B . Далее перейти к п.11.

10. Для невосстанавливаемого устройства оценить среднее время восстановления \bar{T}_y^B по формуле (3.38).

11. Сравнить полученное значение \bar{T}_y^B с заданным $\bar{T}_{узад}^B$. Если $\bar{T}_y^B > \bar{T}_{узад}^B$, то принять меры по сокращению \bar{T}_y^B и выполнить расчеты:

- для восстанавливаемого устройства, начиная с п.8;
- для невосстанавливаемого устройства, начиная с п.9.

Если $\bar{T}_y^B \leq \bar{T}_{узад}^B$ то для восстанавливаемого устройства расчеты закончить, для невосстанавливаемого устройства перейти к п.12.

12. Определить количество A воздушных судов в эксплуатирующей организации и налет t на планируемый период.

13. Выбрать величину $p_{зад}$.

14. Используя формулы (3.40) и (3.41), рассчитать потребное количество устройств в запасном имуществе.

4. Методика оценки безопасности проектируемых систем транспортного РО

4.1 Общая структура методики оценки безопасности системы

Безопасность полета воздушного судна (ВС) зависит от функционирования как самого ВС, так и всех звеньев авиационно-транспортной системы. На современном уровне развития авиационной науки и техники невозможно создать абсолютно безотказные технические системы. Поэтому при разработке и эксплуатации ВС необходимо обеспечить возможность безопасного завершения полета при возникновении отказов.

Свойство ВС в целом и/или его функциональных систем, характеризующее способность обеспечивать безопасное завершение полета в ожидаемых условиях эксплуатации при возможных отказах на борту ВС называется *отказобезопасностью*.

Вопросы обеспечения отказобезопасности решаются в течение жизненного цикла ВС, но основа закладывается на стадии проектирования. Именно на этом этапе осуществляется анализ функциональных отказов и возможные последствия их возникновения на всех этапах полета ВС.

Существует документ «Руководство 4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации». Документ содержит инструктивные материалы по проведению принятой в авиационной отрасли оценке безопасности, которая включает следующие этапы:

- оценка функциональной опасности
- предварительная оценка безопасности системы;
- оценка безопасности системы.

В документе приводится информация по методам анализа безопасности. В состав этих методов включены:

- анализ дерева неисправности;
- анализ логической схемы;
- анализ видов и последствий отказов;
- сводка анализа видов и последствий отказов;

– анализ общих причин, включающий: анализ зонной безопасности, анализ специфического риска и анализ общего режима.

Нужно отметить, что данный документ следует рассматривать как технический перевод (к сожалению, не очень высокого качества) документа SAE ARP 4761 "Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment". В документе сохранены все разделы и подразделы документа ARP 4761.

В документе (и в пособии далее) применены следующие сокращения:

- ✓ ССА – анализ общих причин;
- ✓ СМА – анализ общего режима;
- ✓ СМР – сертификационные требования по обслуживанию;
- ✓ DD – анализ логической схемы;
- ✓ FADEC – полностью цифровая система управления двигателем;
- ✓ FHA – оценка функциональной опасности (ОФО);
- ✓ FMEA – анализ видов и последствий отказа;
- ✓ FMES – сводка видов и последствий отказов;
- ✓ FTA – анализ дерева неисправности (отказов) (АДО);
- ✓ МА – Марковский анализ;
- ✓ РМ – рекомендательный материал;
- ✓ PRA – анализ специфического риска;
- ✓ PSSA – предварительная оценка безопасности системы (ПОБС);
- ✓ SSA – оценка безопасности системы (ОБС);
- ✓ TLD – ограниченная по времени отправка в рейс;
- ✓ ZSA – анализ зонной безопасности.

Надо учитывать, что ряд терминов, приведенных в документе, отличается от терминологии ГОСТ Р 27.102-2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения». Так, под неисправностью понимается «нежелаемая аномалия объекта или системы». Что соответствует отказу. А понятие «надежность» в документе трактуется как «вероятность того, что объект будет выполнять требуемую функцию в указанных условиях, в установленный период времени без отказа», что является показателем безотказности, одной из составляющих надежности.

Процесс оценки безопасности следует планировать и контролировать для получения необходимой гарантии, что все ситуации, относящиеся к особым, были определены и что все значащие комбинации отказов, которые могут привести к этим особым ситуациям, рассмотрены.

Применительно к наземному радиоэлектронному оборудованию (РЭО), процесс оценки безопасности включает определение и проверку требований, предъявляемых к разрабатываемому оборудованию. Этот достигается различными методами оценки функций систем, для определения того, что связанные с ними опасности точно установлены. Процесс оценки безопасности в основном является качественным, но может быть и количественным.

Для интегрированных систем должен приниматься во внимание любые дополнительные усложнения и взаимозависимости, которые возникают вследствие интеграции. Во всех случаях введения интегрированных систем, процесс оценки безопасности является основным действием в установлении приемлемых целей безопасности для систем и определении того, что реализация удовлетворяет этим целям.

Рисунок 4.1 представляет видение сверху процесса оценки безопасности (Оценку функциональной опасности, Предварительную оценку безопасности системы, Оценку безопасности системы) и как методы оценки безопасности применяются в этом процессе. Процесс разработки является состоящим из различных подпроцессов. Одним из которых является процесс оценки безопасности. Процесс оценки безопасности начинается на эскизном проекте, для которого формируются требования по безопасности. По мере развития проекта, в него вносятся изменения, и уточненный проект должен быть оценен повторно. Эта повторная оценка может вызвать новые производные требования к проекту. Эти новые требования могут потребовать дальнейших изменений проекта. Процесс оценки безопасности завершается с проверкой того, что проект соответствует требованиям по безопасности.

На основе Руководства № 4761 «По методам оценки безопасности и систем и бортового оборудования самолетов гражданской авиации» можно построить систему оценки безопасности для аэродромных средств радиотехнического обеспечения полетов.

Оценка функциональной опасности проводится в начале цикла разработки технического изделия. Она позволяет определить и классифицировать отказные состояния, связанные с функциями изделия и комбинациями этих функций. Такая классификация отказных состояний устанавливает цели по безопасности. Такие цели показаны в таблице 4.1.

Задачей проведения оценки функциональной опасности (ФНА, ОФО) является четкое определение каждого отказного состояния с проверенным обоснованием его классификации. После того, как будут определены функции каждой системы (исходя из общих функций ВС), каждая система, которая будет применяться для выполнения нескольких таких функций, должна быть дополнительно рассмотрена с применением процесса ОФО. Оценки функциональной опасности повторяются при рассмотрении единичных отказов или комбинаций отказов функций уровня самолета, которые будет выполнять такая система. Результаты ОФО используются как исходное положение для проведения Предварительной оценки безопасности системы.

Этапы реализации оценки безопасности приведены на рисунке 4.2. На схеме представлена общая структура методики оценки безопасности, которая включает в себя: ОФО, ПОБС, ОБС, АДО, и как методы оценки безопасности применяются в каждом отдельном этапе разработки.

Предварительная оценка безопасности системы (PSSA, ПОБС) является упорядоченной проверкой предполагаемой архитектуры системы для определения того, как отказы системы могут приводить к функциональным

опасностям, определенным в ОФО. Целью ПОБС является установленные по безопасности системы и определение того, что при реализации предполагаемой архитектуры разумно ожидать выполнение условий безопасности определенных в ОФО.

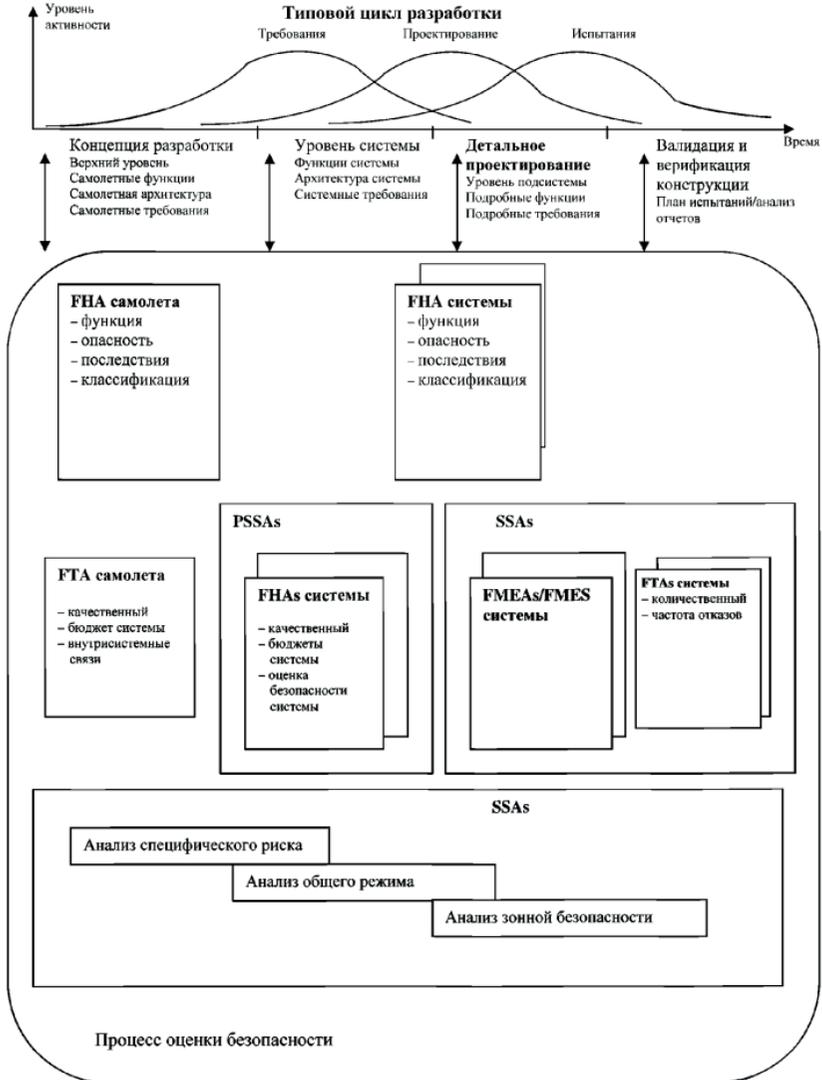


Рисунок 4.1 – Обзор процесса оценки безопасности.

ПОБС является итерационным процессом, связанным с развитием проекта. ПОБС проводится на многих этапах разработки системы, включая определение характеристик системы, составляющих программного обеспечения и аппаратного обеспечения. ПОБС обычно принимает форму Анализа дерева неисправности (может быть использован АЛС или МА) и включает анализ общих причин.



Рисунок 4.2 – Структура методики оценки безопасности

Оценка безопасности системы является упорядоченной, подробной оценкой реализованной системы для демонстрации того, что условия безопасности, определенные в ОФО, и производные требования по безопасности, определенные в ПОБС, удовлетворяются. ОБС обычно основана на Анализе дерева неисправности (отказов) (FTA, АДО), рассматриваемым при выполнении ПОБС (может быть использован анализ логической схемы (DD, АЛС) или марковский анализ (МА)) и использует численные значения, полученные из сводки видов и последствий отказов (FMES, СВПО). В Оценка безопасности системы следует проверить, что все

Таблица 4.1 – Последствия отказных состояний в зависимости от величины вероятности и уровня гарантии качества разработки

Вероятность (численные значения)	На час полета			1 * 10 ⁻⁹	
	1.0	1 * 10 ⁻³	1 * 10 ⁻⁵		
1	2	3	4	6	
Вероятность (качественная)	FAA	Вероятный	Маловероятный	Практически невероятный	
	ARMAK&JAA	Частый	Маловероятный	Крайне маловероятный	
Классификация отказных состояний	FAA	Умеренно вероятный	Сложное	Катастрофиче ское	
	ARMAK&JAA	Незначительное	Сложное	Катастрофиче ское	
Последствия отказных состояний	FAA&JAA	- небольшое уменьшение границ безопасности; - небольшое увеличение нагрузки экипажа; - некоторое неудобство для лиц находящихся на борту.	- существование сокращения запаса безопасности или функциональных возможностей; - значительное увеличение рабочей нагрузки экипажа или условия влияющие на эффективность работы экипажа; - некоторый дискомфорт для лиц находящихся на борту.	- значительное сокращение запаса безопасности или функциональных возможностей; - высокая рабочая нагрузка или такое физическое состояние, которое не дает экипажу выполнять задачи точно или полностью; - существенное влияние на лиц находящихся на борту.	- все отказные состояния, которые претягивают продолжению безопасного полета и посадки.
	ARMAK	- незначительное ухудшение характеристик; - незначительное увеличение рабочей	- заметное ухудшение характеристик (или) выход одного	- значительное ухудшение характеристик (или) достижение	при возникновении непредотвращаемой гибели людей

Продолжение таблицы 4.1.

1	2	3	4	5	6
Уровень гарантии качества разработки	Р-4754	нагрузки на экипаж (например, изменение плана полета).	или нескольких параметров за эксплуатационные ограничения, но без достижения предельных ограничений; -уменьшение способности экипажа справиться с неблагоприятными условиями (возникшей ситуацией) как из-за увеличения рабочей нагрузки, так и из-за условий, понижающих эффективность действий экипажа.	(превышением) предельных ограничений; - физическое утомление или такая рабочая нагрузка на экипаж, что уже нельзя полагаться на то, что он выполнит свои задачи точно или полностью.	оказывается практически невозможным.
		Уровень D	Уровень С	Уровень В	Уровень А

значительные проявления отказов, содержащиеся в СВПО, рассмотрены на предмет включения в качестве первичных событий в АДО. СВПО обобщает отказы, выявленные в ходе анализа видов и последствия отказа (FMEA, АВПО), группируя отказы с учетом их последствий. Оценка безопасности системы (SSA, ОБС) должна включать относящиеся результаты анализа общих причин (ССА, АОП).

Архитектура любой системы устанавливает ее структуру и ограничения, в которые реализуется конкретный проект системы. Анализ общей причины помогает разработать архитектуру конкретной системы и архитектуру относящихся систем с использованием оценки чувствительности всех архитектур к событиям общей причины. Такие события общей причины оцениваются при выполнении следующих видов анализа: Анализа специфического риска, Анализа безопасности зон и Анализа общего режима. Результаты Анализа общей причины выполняемого на уровне самолета, рассматриваются в ПОБС и ОБС каждой системы.

При выполнении АДО как в ходе ПОБС, так и ходе анализа безопасности системы, используемые в анализе средства обнаружения отказов, обеспечивающие задачи обслуживания и время воздействия, должны быть согласованы с задачами и интервалами программы наземного обслуживания, применяемой к самолету. Во многих случаях средствами обнаружения отказов будет наблюдение их использования в кабине экипажа или встроенные средства системы (например, средства тест-контроля, контроля при включении питания и т.д.). Анализ логических схем принципиально эквивалентен АДО и выбор одного из них определяется предпочтением выполняющего анализ специалиста. Методы Марковского анализа часто применяются при рассмотрении различных сценариев обслуживания.

В процессе оценки безопасности используются не только количественные показатели. В нем рассматриваются такие качественные вопросы как: уровни гарантии разработки, поля радиопомех высокой энергии, удары молний и т.п. Многое из этого включено в анализ общей причины.

Процесс анализа безопасности завершается, когда результаты ОБС верифицированы с материалами Оценки функциональной опасности уровня системы и самолета.

4.2 Оценка функциональной опасности

Целью ОФО является рассмотрение функций на наиболее приемлемом уровне, выявление и классификация возникающих отказных состояний вследствие как потери функций, так и их неправильного выполнения. ОФО должна выявлять отказные состояния для каждого этапа полета, если воздействие отказа и классификация состояния изменяется от одного этапа к другому. Как только определены требования верхнего уровня, они могут использоваться для разработки требований нижнего уровня, как часть процесса ПОБС для систем или компонент. Этот процесс продолжается, пока не будет завершён процесс построения таблицы.

Выполнение ОФО на высшем приемлемом уровне зависит от полноты знаний и опыта, и может потребовать консультаций с большим числом специалистов.

ОФО уровня системы также является качественной оценкой, которая выполняется итерационно и становится более точной и основательной с развитием системы. В ней рассматриваются отказы и комбинации отказов системы, которые влияют на функции уровня системы. Оценка любого конкретного объекта программного или аппаратного обеспечения не является задачей ОФО уровня системы. Однако если в отдельных системах используются подобные архитектурные решения или одинаковые сложные компоненты, а также если вводятся дополнительные отказные состояния уровня системы, то ОФО следует видоизменить для выявления и классификации таких новых отказных состояний.

Результаты ОФО уровня системы является отправной точкой для создания и распределения требований по безопасности.

Средством создания требований более низкого уровня может служить АДО. Требования формируются материалами ОФО соответствующего уровня (ОФО и дерево неисправности ПОБС для ОФО системы). Эти производные требования следует взять в качестве требований в спецификации систем.

ОФО является первым шагом в процессе оценки безопасности. Процесс ОФО использует подход сверху-вниз для идентификации функциональных отказных состояний и оценки их последствий.

Оценка выполняется в следующем порядке:

1. Определяются все функции, относящиеся к уровню рассмотрения (внутренние функции и функции обмена);
2. Определяются и описываются отказные состояния, связанные с этими функциями, при рассмотрении одиночных и множественных отказов в нормальных и усложненных условия эксплуатации;
3. Определяются последствия отказных состояний;
4. Отказные состояния классифицируются в соответствии последствиями на уровне системы.
5. Назначаются требования к отказным состояниям, подлежащие рассмотрению на более низком уровне;

Следует идентифицировать все функции, связанные с уровнем рассмотрения, как внутренние функции, так и функции обмена. Эти функции определяются сбором необходимых исходных данных и последующим формированием перечня функций.

4.3 Анализ дерева отказов

Процесс предварительной оценки безопасности системы является систематическим исследованием для определения того, каким образом отказы могут приводить к полученным в ходе ОФО функциональным опасностям и как могут удовлетворяться соответствующие требования по безопасности. Процесс ПОБС связан с разработкой конструкции системы и является

итерационным, поскольку итерационным является процесс проектирования. Процесс ПОБС проходит через весь цикл проектирования.

Для каждой анализируемой системы ПОБС обращается ко всем значительным отказным состояниям, идентифицированным при проведении ОФО. Методы анализа могут быть как качественные, так и количественные.

Анализ дерева отказов – дедуктивный анализ нарушения, который сосредотачивается на одном специфическом нежелательном событии и предоставляет метод для определения причин этого события. Другими словами, анализ дерева неисправности – "нисходящая" процедура оценки системы, в которой сформирована и затем оценена качественная модель для специфического нежелательного события. Выполняющий анализ начинает с нежелательного события верхнего уровня и систематически определяет все вероятные одиночные отказы и комбинации отказов функциональных блоков системы на следующем нижнем уровне, которые могут вызывать это событие. Анализ развивается вниз, последовательно через более детальные (то есть нижние) уровни конструкции объекта, до достижения первичного нераскрываемого события или до получения подтверждения, что требования к нежелательному событию верхнего уровня удовлетворяются. Первичное событие определяется как событие, которое по той или другой причине далее не разрабатывается (то есть событие не нуждается в разбиении на более точные уровни детализации для показа соответствия применяемым к анализируемой системе требованиям по безопасности).

Графическое представление дерева неисправности иерархично и получило наименование из-за показываемых ветвлений. Как один из методов оценки безопасности, используемых для гарантии выполнения системой/оборудованием установленных функции безопасности, анализ дерева неисправности связан с гарантией того, что аспекты безопасности конструкции идентифицированы и контролируются.

Применение АДО обеспечивает:

1. Помощь при выполнении оценок и рассмотрений техническими и сертифицирующими органами. (Завершенное дерево неисправности показывает только отказные события, которые могли в отдельности или в комбинации привести к установленному нежелательному событию верхнего уровня).

2. Оценку влияния системы на безопасность.

3. Определение значения вероятности встречаемости события верхнего уровня.

4. Оценку последствий одиночных и множественных отказов.

5. Оценку интервалов воздействия, скрытого состояния и интервалов "риска" в отношении их общего влияния на систему.

6. Наблюдаемость потенциальных границ событий с общей причиной.

7. Оценку источников отказов с общей причиной.

8. Оценку свойств "отказобезопасности" системы (устойчивая к отказам и устойчивая к ошибкам).

"Нисходящий" анализ, подобный АДО можно применять на различных уровнях детализации для рассмотрения соответственно предполагаемой и имеющейся компонентов системы.

Конструирование дерева неисправности выполняется следующими пятью шагами:

1. Формулируется нежелательное событие верхнего уровня в ясном, кратком выражении (и его вероятность как заданное значение для отказа или для интенсивности отказа, если они применимы).

2. Разрабатываются верхний и промежуточные ярусы дерева неисправности. Определяются промежуточные отказы и комбинации отказов, которые являются минимальными, непосредственными, необходимыми и достаточными для того, чтобы произошло событие верхнего уровня, и связываются соответствующими стандартными логическими символами дерева неисправности. Расширяется каждый первый уровень события отказа до следующего нижнего уровня.

3. Разрабатывается каждое событие отказа через последовательные более детальные уровни конструкции системы до тех пор, пока не будут установлены исходные причины или дальнейшее проявление будет сочтено ненужным.

Выполняющий анализ вводит событие дерева неисправности верхнего уровня в прямоугольный символ события. Это утверждение должно определять, что является Нежелательным событием и когда оно происходит.

Для большинства деревьев неисправности это событие верхнего уровня уже установлено в ОФО или в другом дереве неисправности верхнего уровня и требуется только его копирование в прямоугольный символ события.

В других случаях, будет необходимо разъяснить утверждение нежелательного события перед его занесением в прямоугольный символ события.

4. Разрабатываются верхний и промежуточные ярусы дерева неисправности.

Нежелательное событие верхнего уровня должно быть выражено понятно и кратко, потому что это устанавливает тон для ряда вопросов, которые будут задаваться при конструировании различных уровней дерева неисправности.

Затем, выполняющий анализ расширяет дерево, в направлении "сверху-вниз" при рассмотрении вышеупомянутых вопросов для события или последствия отказа, так как это описано, на каждом новом уровне. При рассмотрении отказоустойчивых событий, основанных на кратных отказах, выполняющий анализ должен рассмотреть влияния неправильных выходов и неисправных механизмов защиты и реконфигурации.

В ходе конструирования дерева неисправности необходимо удостовериться, что предопределенное соглашение о наименованиях выдерживается так, что каждый работающий над данной системой создает деревья неисправности тем же самым способом. При выборе соглашения о наименованиях, следует иметь в виду три вещи:

а. Соглашение о наименованиях должно предотвращать конфликты между событиями; то есть, никакие два различных события не могут иметь то же самое название, а идентичные события должны иметь то же самое название. Это критично точного сокращения с использованием булевой алгебры.

б. Соглашение о наименованиях не должно быть слишком непонятно или кто-либо рассматривающий дерево не должен постоянно обращаться к некоторому виду таблицы, чтобы декодировать название.

с. Соглашение о наименованиях должно быть сопровождаемым; то есть, уточнение соглашения не должно приводить к переименованию всех событий, потому что существующее не позволяет в последующем добавления нескольких новых событий.

5. Расширение ветвей верхнего события до первичных событий. Этот раздел рассматривает третий шаг конструирования дерева неисправности.

Разрабатывается каждое событие отказа через последовательные более детальные уровни конструкции системы до тех пор, пока не будут установлены исходные причины или дальнейшее проявление будет сочтено ненужным.

Далее выполняющий анализ должен разработать и завершить дерево неисправности, расширяя ветви дерева неисправности вплоть до первичных событий (то есть до основных событий, внешних событий и неразрабатываемых событий). Эти первичные события являются корневыми причинами отказных событий первого уровня.

Корневая причина, заключающаяся в отказе/ошибке аппаратных средств или ошибке программного обеспечения, будет разделена на уровни детализации, необходимые для поиска соответствия конструкции системы целям безопасности. В этом месте становится очевидным воздействие цели АДН на дальнейшие действия в анализе. Если целью АДН является качественная оценка, накопление дальнейшей информации относительно первичного события не обязательно (до тех пор, пока не будет определено, что далее требуется детальный качественный анализ). Если целью АДН является количественная оценка, то следует собрать более детальную информацию относительно первичного события (интенсивности отказов аппаратных средств и времена воздействия или "риска").

4.4 Оценка безопасности системы

Оценка безопасности системы является методически всесторонней оценкой созданной системы для демонстрации соответствия относящимся к ней требованиям по безопасности. Процесс анализа системы подобен действиям ПОБС, но отличается по назначению. Отличия между ПОБС и ОБС в том, что ПОБС является методом оценки предполагаемой разработки требований по безопасности к системе/объекту, тогда как ОБС является верификацией того, что реализованный проект соответствует как качественным, так и количественным требованиям по безопасности, определенным в ОФО и ПОБС.

ОБС объединяет результаты различных анализов для проверки безопасности системы в целом и охвата всех конкретных особенностей обеспечения безопасности определенных в ПОБС. Процесс документирования ОБС включает, при необходимости, доказательства и результаты уместных анализов. Выходной документ ОБС может содержать следующую информацию:

- а. Описание системы.
- б. Перечень отказных состояний (ОФО, ПОБС).
- в. Классификацию отказных состояний (ОФО, ПОБС).
- г. Качественный анализ отказных состояний АДН.
- д. Количественный анализ отказных состояний АДН.
- е. Уровни гарантии разработки для аппаратных средств (ПОБС).

Движение процесса ОБС представлено последовательными уровнями верификации. Поднимаясь по этим периферическим уровням верификации на соответствие требованиям по безопасности определенным в процессе выполнения ПОБС проверяются надежность элементов аппаратных средств.

Входными данными ПОБС являются результаты ОФО уровня системы. Для каждого варианта эти данные могут включать:

- а. Отказные состояния и требования, идентифицированные в ОФО уровня системы.
- б. Перечень и функции оборудования системы.
- с. Интерфейсы системы и связи с другими системами.

После завершения формирования требований к системе в ОФО, каждое идентифицированное аварийное или катастрофическое отказное состояние должно быть оценено, оценка должна:

1. Показать, используя Анализ дерева отказов или подобный метод, как комбинации отказов отдельных объектов приводят к рассматриваемому отказному состоянию.
2. Идентифицировать все требования, связанные с АДО посредством определения: отказов с общей причиной.

(Примечание: Отказные состояния, классифицированные как сложные или усложнение условий полета, могут оцениваться, при необходимости, с использованием приведенных выше методов.)

В данном разделе предоставлена разработанная, с помощью руководства №4761(по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования самолетов гражданской авиации), методика оценки безопасности аэродромных средств обеспечения полетов, а также методы проведения оценки безопасности в обеспечении сертификации аэродромного РЭО.

4.5 Анализ функциональных отказов на примере радиовысотомера А-053-08

В качестве примера приведен анализ функциональных отказов радиовысотомера А-053-08. Для начала необходимо изучить описание анализируемого устройства с целью установления всех функциональных зависимостей.

Описание радиовысотомера А-053-08.

Радиовысотомер А-053-08 предназначен для определения высоты полета летательного аппарата (далее по тексту – объекта).

Радиовысотомер А-053-08 выполняет функции:

- выдача в бортовые системы информации о высоте полета объекта: выдача сигнала «Исправность» в бортовые системы объекта исправной работе радиовысотомера: выдача сигнала разрешение использования информации (РИИ) бортовые системы объекта при исправной работе радиовысотомера и наличии отраженного от поверхности земли сигнала;
- осуществление общего контроля работоспособности радиовысотомера на земле и в полете при поступлении внешней команды «Контроль РВ» и выдач; контрольной высоты: блокирование действия команды «Контроль РВ» при поступлении внешней команды «Запрет теста».

Основные технические данные.

1. Диапазон измеряемых радиовысотомером высот от 0 до 1500 м.
2. Радиовысотомер выдает в бортовые системы объекта информацию (высоте в виде последовательного двоичного трехуровневого 32-разрядного код; в соответствии с требованиями ГОСТ 18977-79 и РТМ 1495-75 с изменением (код Н1 (а), код Н 1 (б)). Передача информации со скоростью $12,5 \pm 1\%$ Кбит/с.
3. Погрешность измерения высоты в летных условиях при углах крена и тангажа (совместно) до 20°C вероятностью 0,95 не более $\pm 0,45$ м или $\pm 0,02$ Н, что больше (Н – высота полета).
4. Радиовысотомер в исправном состоянии выдает сигнал «Исправность» в виде напряжения бортовой сети +27 В при токе нагрузки более 0,1 А.
5. Радиовысотомер выдает сигнал разрешения использования: информации (РИИ) в виде напряжения бортовой сети +27 В при токе нагрузки более 0,1 А при исправной работе радиовысотомера и наличии отраженного о поверхности земли сигнала.
6. Радиовысотомер в режиме «Контроль» выдает контрольное значение высоты от 44 до 54 фут при поступлении внешней команды «Контроль РВ».
7. В радиовысотомере блокируется действие команды «Контроль РВ» при поступлении внешней команды «Запрет теста».

Состав и режимы работы радиовысотомера А-053-08.

1. Состав радиовысотомера:
 - Прибор А-053-1-02 – приемопередатчик;
 - Прибор А-053-2 (2 шт.) – антенна;
 - Кабели 14-052, 24-052 (W1, W2).
- В состав прибора А-053-1-02 входят:
- Модуль АР-95-03 – приемопередающий;
 - Ячейка ДН-052-01 – усилитель преобразованного сигнала;

– Ячейка Л-053-02 – поиск и обнаружение преобразованного сигнала формирования напряжения модуляции, автоматический и полуавтоматический контроль;

– Ячейка ИХ-053-04 – формирование выходного сигнала высоты, сигналом РИИ, «Исправность»;

– Ячейка ЛА-053-01 – формирование напряжений электропитания. Функциональная схема радиовысотомера А-053-08 приведена на рисунке 4.3.

2. Режимы работы радиовысотомера:

– режим работы;

– режим контроля.

В режиме работы радиовысотомер обеспечивает выдачу информации в бортовые системы объекта в соответствии с согласованными связям: радиовысотомера с системами объекта, а также проводится контроль исправности встроенной системой автоматической контроля РСК).

В режиме «Контроль» (при подаче внешней команды «Контроль РВ» проводится контроль исправности радиовысотомера с помощью средств полуавтоматического контроля и выдача контрольного значения высоты.

Контроль радиовысотомера с помощью средств полуавтоматического контроля может проводиться как на земле, так и в полете.

На функциональной схеме радиовысотомера (см. рис. 4.3) показаны входные и выходные сигналы.

Входные сигналы:

– отраженный от подстилающей поверхности сигнал, принятый приемной антенной;

– 27 В – напряжение электропитания;

– «Контроль РВ» – команда, подаваемая для приведения радиовысотомера в режим «Контроль»;

– «Запрет текста» – команда, блокирующая режим «Контроль».

Выходной сигнал:

– код Н1 (а, б) несет информацию о высоте и состоянии радиовысотомера;

– сигнал РИИ – сигнал разрешения использования информации в вид разовой команды;

– сигнал исправности – сигнал об исправности радиовысотомера в вид разовой команды.

Расчет.

– 1. Вероятности отказов радиовысотомера А-053-08 рассчитаны в соответствии с ОСТ 100132-97 за время работы 1 час.

– 2. Исходные данные

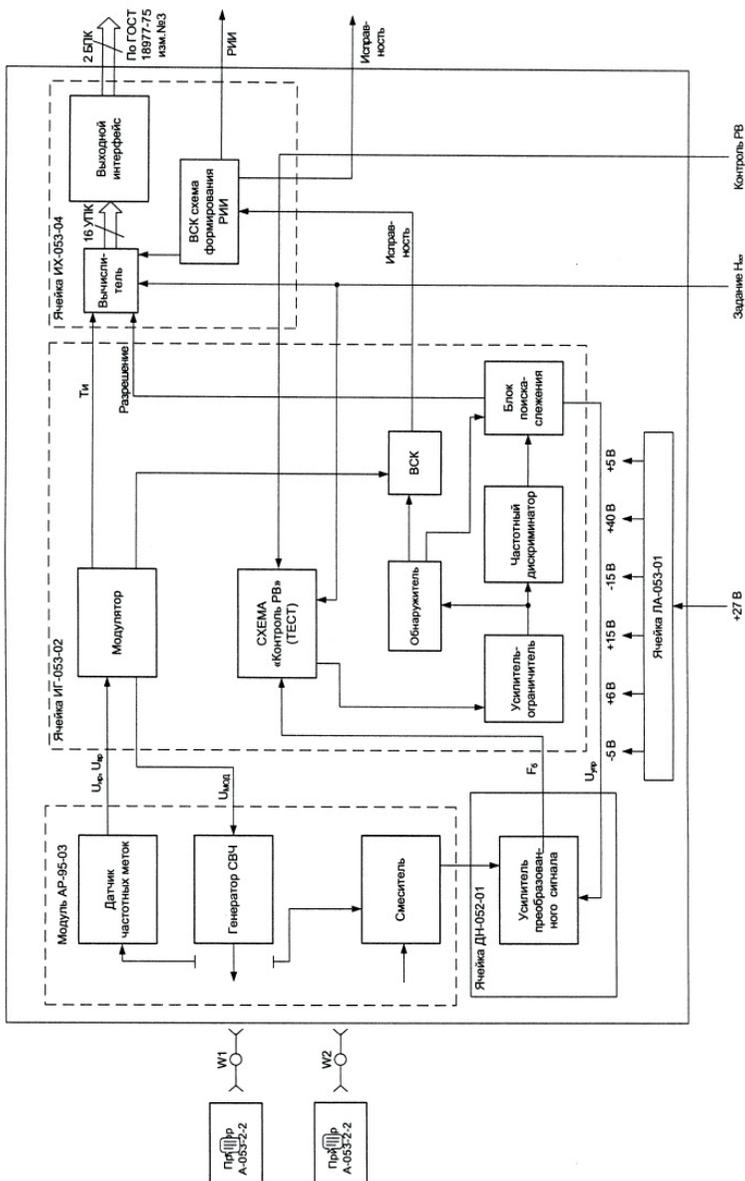


Рисунок 4.3 – Функциональная схема радиовысотомера А-053-08

При анализе функциональных отказов радиовысотомера А-053-08 расчетными элементами являются:

- модуль АР-95-03;
- ячейка ДН-052-01;
- ячейка ЛА-053-01;
- ячейка ИГ-053-02;
- ячейка ИХ-053-04;
- прибор А-053-1-02;
- прибор А-053-2 (антенны 2 шт);
- СВЧ кабели (14-053, 24-052).

Функциональные схемы расчетных элементов приведены на рисунках 4.4 – 4.9.

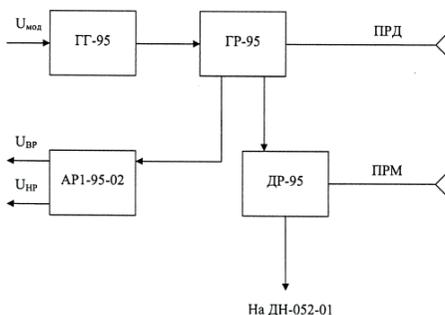


Рисунок 4.4 – Функциональная схема модуля АР-95-03

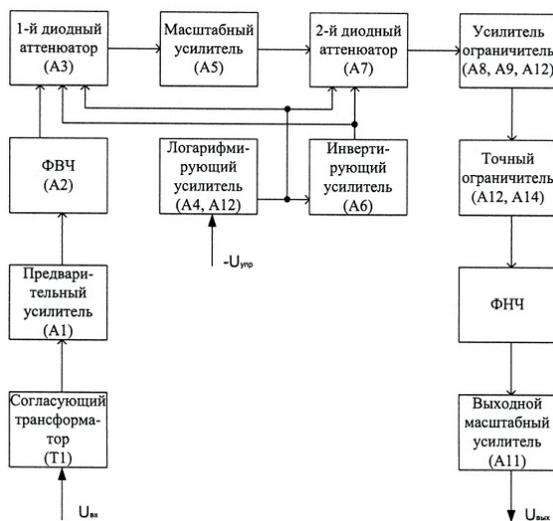


Рисунок 4.5 – Функциональная схема ячейки ДН-052-01.

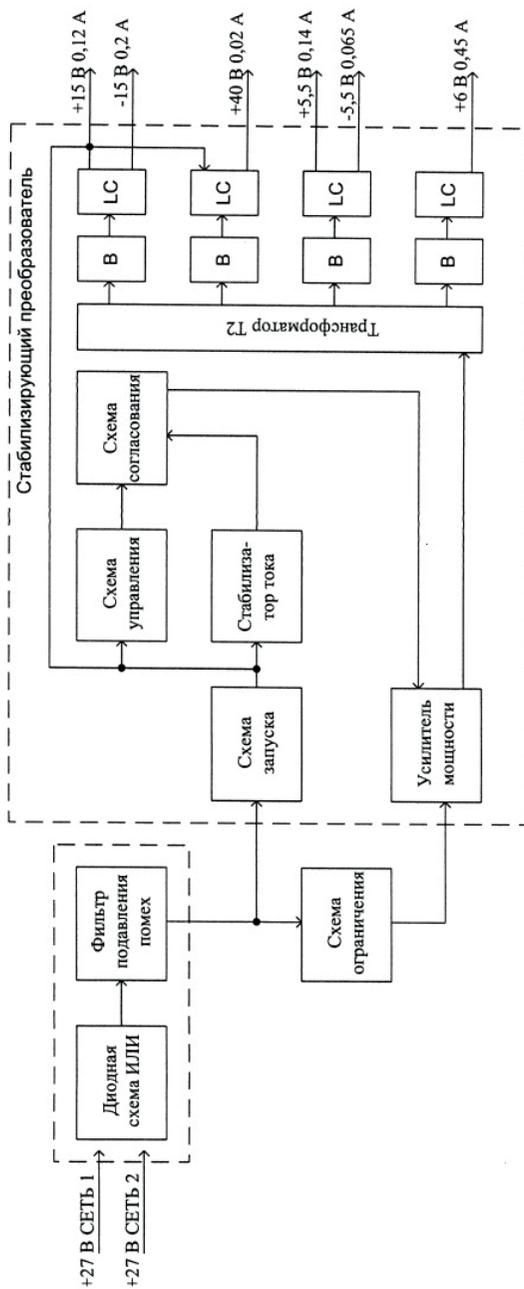


Рисунок 4.7 – Функциональная схема ячейки ДА-053-01

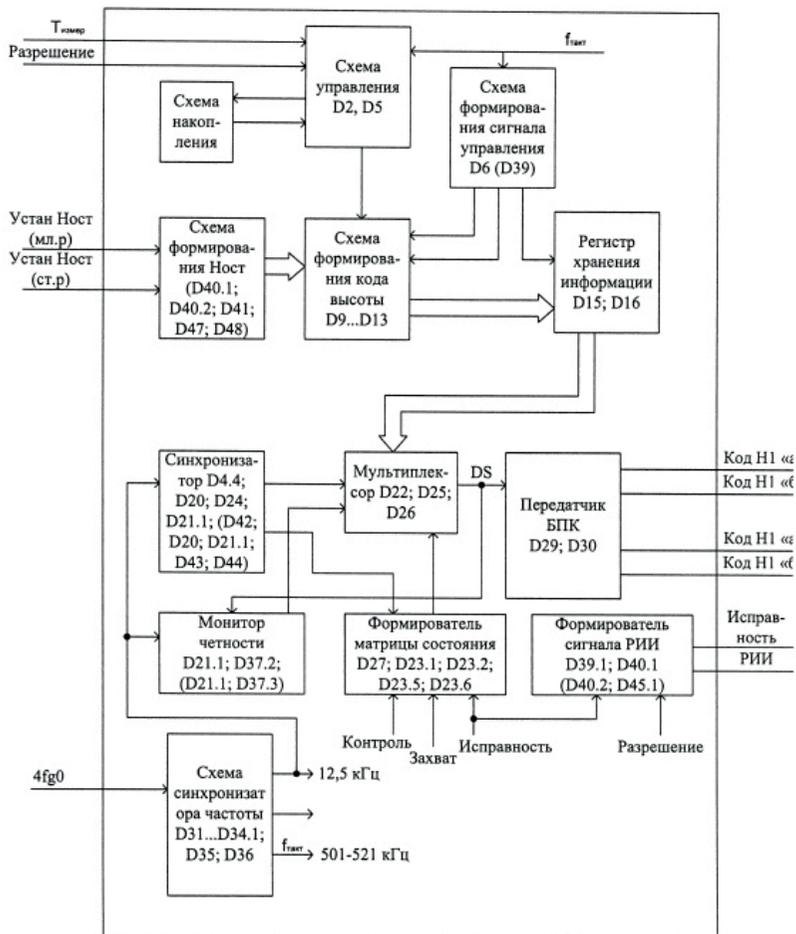


Рисунок 4.9 – Функциональная схема ячейки IX-053-04

3. Интенсивности отказов функциональных узлов расчетных элементов радиовысотомера А-053-08 приведены в таблице 4.2

Таблица 4.2 – Интенсивность отказов функциональных узлов радиовысотомера А-053-08

Наименование модуля, ячеек	Наименование функциональных узлов, ячеек	$\lambda_p \cdot 10^{-6}, 1/ч$	код
1	2	3	4
Модуль АР-95-03	Ячейка ГГ-95 (задающий генератор)	4,991	$\lambda_{1,1}$

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4
	Ячейка ГГ-95 (усилитель мощности)	3,170	$\lambda_{1,2}$
	Ячейка AP1-95-02 (блок резонаторов)	0,928	$\lambda_{1,3}$
	Ячейка ДР-95 (МШУ и балансный смеситель)	2,444	$\lambda_{1,4}$
	Ячейка ГГ-95 (усилитель мощности)	3,170	$\lambda_{1,2}$
Ячейка ДН-052-01	Трансформатор (Т1)	0,0077	$\lambda_{2,1}$
	Операционный усилитель (А1)	0,478	$\lambda_{2,2}$
	ФВЧ (А2)	0,420	$\lambda_{2,3}$
	1-й аттенуатор (А3)	0,342	$\lambda_{2,4}$
	Операционный усилитель (А5)	0,483	$\lambda_{2,5}$
	2-й аттенуатор (А7)	0,342	$\lambda_{2,6}$
	Усилитель ограничитель (А8, А9, А13)	1,114	$\lambda_{2,7}$
	Точный ограничитель (А10, А14)	0,670	$\lambda_{2,8}$
	ФНЧ (V1, V2, V3)	0,353	$\lambda_{2,9}$
	Масштабный усилитель (А11)	0,456	$\lambda_{2,10}$
	Усилитель логарифмический (А4, А12)	0,648	$\lambda_{2,11}$
	Инвертор (А6)	0,411	$\lambda_{2,12}$
ЛА-053-01	Схема объединения сетей	0,323	$\lambda_{3,1}$
	Сетевой фильтр	0,141	$\lambda_{3,2}$
	Стабилизирующий преобразователь (стабилизатор напряжения, преобразователь)	5,737	$\lambda_{3,3}$
	Трансформатор	0,075	$\lambda_{3,4}$
	Выпрямитель +6 В	1,810	$\lambda_{3,5}$
	Выпрямитель ± 15 В	1,108	$\lambda_{3,6}$
	Выпрямитель $\pm 5,5$ В	1,452	$\lambda_{3,7}$
	Выпрямитель +40 В	1,371	$\lambda_{3,8}$
Ячейка ИГ-053-01	КОМПАРАТОРЫ ВР, НР	0,628	$\lambda_{4,1}$
	ОБНАРУЖИТЕЛЬ:		
	Обнаружитель 1	0,348	$\lambda_{4,2}$
	Обнаружитель 2	0,604	$\lambda_{4,3}$
	Перемножитель	0,224	$\lambda_{4,4}$
	Перемножитель	0,224	$\lambda_{4,5}$
	Сумматор	0,044	$\lambda_{4,6}$
УСИЛИТЕЛЬ-ОГРАНИЧИТЕЛЬ	0,635	$\lambda_{4,7}$	

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4
	ЧАСТОТНЫЙ ДИСКРИМИНАТОР:		
	Перемножитель 1	0,224	$\lambda_{4,8}$
	Перемножитель 2	0,224	$\lambda_{4,9}$
	Компаратор 1	0,184	$\lambda_{4,11}$
	Компаратор 2	0,184	$\lambda_{4,12}$
	Схема И1	0,093	$\lambda_{4,13}$
	Схема И2	0,093	$\lambda_{4,14}$
	Ключ	0,113	$\lambda_{4,15}$
	БЛОК ПОИСКА-СЛЕЖЕНИЯ		
	Компаратор	0,754	$\lambda_{4,16}$
	Инвертор	0,344	$\lambda_{4,17}$
	Формирователь управляющего напряжения	1,514	$\lambda_{4,18}$
	Переключатель	0,581	$\lambda_{4,19}$
	Интегратор	0,462	$\lambda_{4,20}$
	Переключатель	0,304	$\lambda_{4,21}$
	СХЕМА КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЯ:		
	ФАПЧ	0,299	$\lambda_{4,22}$
	Делитель частоты управления	0,749	$\lambda_{4,23}$
	СХЕМА ИЛИ	0,233	$\lambda_{4,24}$
	МОДУЛЯТОР:		
	Компаратор двухпороговый	0,706	$\lambda_{4,25}$
	Управляемый интегратор	1,070	$\lambda_{4,26}$
	Ключ	0,300	$\lambda_{4,27}$
	Триггер реверса	0,293	$\lambda_{4,28}$
	ФОРМИРОВАТЕЛЬ СИГНАЛА ИСПРАВНОСТИ	0,531	$\lambda_{4,29}$
	ФОРМИРОВАТЕЛЬ СИГНАЛА РАЗРЕШЕНИЯ	0,295	$\lambda_{4,30}$
	ФОРМИРОВАТЕЛЬ КВАДРАТУРНЫХ СИГНАЛОВ	0,047	$\lambda_{4,31}$
	ФОРМИРОВАТЕЛЬ ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ	0,357	$\lambda_{4,32}$
	ФОРМИРОВАТЕЛЬ СИГНАЛОВ КОНТРОЛЯ	0,025	$\lambda_{4,33}$
	ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ	0,433	$\lambda_{4,34}$
	СОЕДИНИТЕЛЬ	0,220	$\lambda_{4,35}$
	ФИЛЬТР ПИТАНИЯ	0,496	$\lambda_{4,36}$
Ячейка ИХ- 053-04	СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ	0,255	$\lambda_{5,1}$
	СХЕМА НАКОПЛЕНИЯ	0,426	$\lambda_{5,2}$

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4
	СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА УПРАВЛЕНИЯ	0,172	$\lambda_{5,3}$
	СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОЙ ВЫСОТЫ	0,289	$\lambda_{5,4}$
	СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ КОДА ВЫСОТЫ	0,710	$\lambda_{5,5}$
	РЕГИСТР ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ	0,276	$\lambda_{5,6}$
	СИНХРОНИЗАТОР	0,795	$\lambda_{5,7}$
	МУЛЬТИПЛЕКСОР	0,276	$\lambda_{5,8}$
	ПЕРЕДАТЧИК БПК	0,226	$\lambda_{5,9}$
	МОНИТОР ЧЕТНОСТИ	0,255	$\lambda_{5,10}$
	ФОРМИРОВАТЕЛЬ МАТРИЦЫ СОСТОЯНИЯ	0,285	$\lambda_{5,11}$
	ФОРМИРОВАТЕЛЬ СИГНАЛА РИИ	0,457	$\lambda_{5,12}$
	СХЕМА СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТЫ	0,824	$\lambda_{5,13}$
	КОММУТАЦИОННАЯ ПЛАТА: Схема отключения излучения	0,651	$\lambda_{5,14}$
	Схема выдачи сигнала РИИ	1,210	$\lambda_{5,15}$
	Схема выдачи сигнала ИСПРАВНОСТЬ	0,416	$\lambda_{5,16}$
Прибор А-053-1-02	Узел фильтров	1,014	$\lambda_{6,1}$
	Соединители	0,446	$\lambda_{6,2}$
Прибор А-053-2 (2 шт)		0,076	$\lambda_{7,1}$
СВЧ кабели	1-А-052, 2-А-052	0,224	$\lambda_{8,1}$

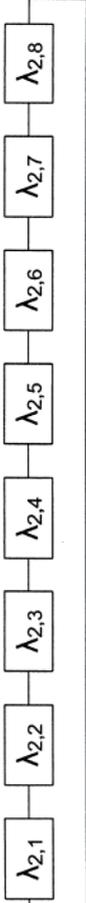
4. Методика расчета

1) Анализ функциональных отказов радиовысотомера А-053-08 проводится при использовании метода логических схем в соответствии с требованиями ОСТ 1 00132-97. На основании анализа функциональной схемы радиовысотомера, взаимосвязей между ее элементами построены логические схемы вида отказов радиовысотомера. Виды отказов, вычисленные значения вероятностей отказов за время 1 ч, логические схемы видов отказов приведены в таблице 4.3.

2) Вероятность вида отказа системы с последовательным соединением элементов логической схем рассчитывается по формуле:

$$Q(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_i) \quad (4.1)$$

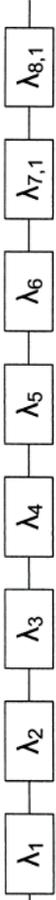
Таблица 4.3 – Интенсивность отказов функциональных узлов.

Вид отказа	Логическая схема элементов, влияющих на возникновение вида отказа радиовысотомера	Вероятность отказа Q за время t=1 час
1 Отказ модуля АР-95-03	 $Q(t) = 1 - (1 - t \cdot \lambda_{1,1}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{1,2}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{1,3}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{1,4})$	$11,533 \cdot 10^{-6}$ (λ 1)
2 Отказ ячейки ДН-052-01	 $Q(t) = 1 - (1 - t \cdot \lambda_{2,1}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{2,2}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{2,3}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{2,4}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{2,5}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{2,6}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{2,7}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{2,8}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{2,9}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{2,10}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{2,11}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{2,12})$	$5,725 \cdot 10^{-6}$ (λ 2)
3 Отказ ячейки ЛА-053-01	 $Q(t) = 1 - (1 - t \cdot \lambda_{3,1}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{3,2}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{3,3}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{3,4}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{3,5}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{3,6}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{3,7}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{3,8})$	$12,017 \cdot 10^{-6}$ (λ 3)

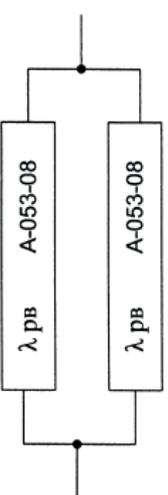
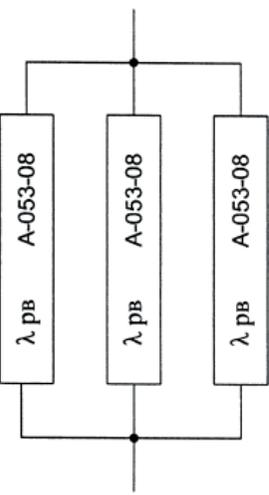
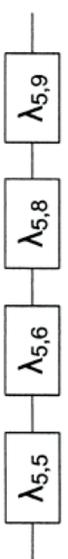
Продолжение таблицы 4.3

1	2	3
<p>4 Отказ ячейки ИГ-053-02</p>		<p>14,008*10⁻⁶ (λ 4)</p>
<p>5 Отказ ячейки ИХ-053-04</p>		<p>Q(t)=1-(1-t*λ4,1)*(1-t*λ4,2)*(1-t*λ4,3)*(1-t*λ4,4)*(1-t*λ4,5)*(1-t*λ4,6)*(1-t*λ4,7)*(1-t*λ4,8)*(1-t*λ4,9)*(1-t*λ4,10)* *(1-t*λ4,11)*(1-t*λ4,12)*(1-t*λ4,13)*(1-t*λ4,14)*(1-t*λ4,15)*(1-t*λ4,16)*(1-t*λ4,17)*(1-t*λ4,18)*(1-t*λ4,19)*(1-t*λ4,20)* *(1-t*λ4,21)*(1-t*λ4,22)*(1-t*λ4,23)*(1-t*λ4,24)*(1-t*λ4,25)*(1-t*λ4,26)*(1-t*λ4,27)*(1-t*λ4,28)*(1-t*λ4,29)*(1-t*λ4,30)* *(1-t*λ4,31)*(1-t*λ4,32)*(1-t*λ4,33)*(1-t*λ4,34)*(1-t*λ4,35)*(1-t*λ4,36)</p>

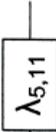
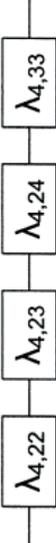
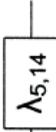
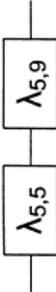
Продолжение таблицы 4.3

1	2	3
	$Q(t) = 1 - (1 - t \cdot \lambda_{5,1}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{5,2}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{5,3}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{5,4}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{5,5}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{5,6}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{5,7}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{5,8}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{5,9}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{5,10}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{5,11}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{5,12}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{5,13}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{5,14}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{5,15}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{5,16})$	$7,523 \cdot 10^{-6}$ (λ 5)
6 Отказ прибора А-053-1-02 (без модуля ячеек)	$Q(t) = 1 - (1 - t \cdot \lambda_{6,1}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{6,2})$ 	$1,46 \cdot 10^{-6}$ (λ 6)
7 Отказ прибора А-053-2	$Q(t) = t \cdot \lambda_{7,1}$ 	$0,076 \cdot 10^{-6}$ (λ 7)
8 Отказ СВЧ кабелей	$Q(t) = t \cdot \lambda_{8,1}$ 	$0,024 \cdot 10^{-6}$ (λ 8)
9 Отказ прибора А-053-1-02 (с модулем и ячейками)	$Q(t) = 1 - (1 - t \cdot \lambda_1) \cdot (1 - t \cdot \lambda_2) \cdot (1 - t \cdot \lambda_3) \cdot (1 - t \cdot \lambda_4) \cdot (1 - t \cdot \lambda_5) \cdot (1 - t \cdot \lambda_6)$ 	$52,266 \cdot 10^{-6}$ (λ 9)
10 Отказ радиовысотомера А-053-08	$Q(t) = 1 - (1 - t \cdot \lambda_1) \cdot (1 - t \cdot \lambda_2) \cdot (1 - t \cdot \lambda_3) \cdot (1 - t \cdot \lambda_4) \cdot (1 - t \cdot \lambda_5) \cdot (1 - t \cdot \lambda_6) \cdot (1 - t \cdot \lambda_7) \cdot (1 - t \cdot \lambda_8) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{8,1})$ 	$52,566 \cdot 10^{-6}$ (λ 10)

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3
<p>11 Отказ системы двух радиовысомер ов А-053-08</p>	 <p style="text-align: center;">$Q(t)=t \cdot \lambda_{рв} \cdot t \cdot \lambda_{рв}$</p>	<p style="text-align: center;">$2,726 \cdot 10^{-6}$ (λ 11)</p>
<p>12 Отказ системы из трех радиовысомер ов А-053-08</p>	 <p style="text-align: center;">$Q(t)=t \cdot \lambda_{рв} \cdot t \cdot \lambda_{рв} \cdot t \cdot \lambda_{рв}$</p>	<p style="text-align: center;">$1,452 \cdot 10^{-13}$</p>
<p>13 Отказ: не выдаются сигналы Код Н1 (а) и Код Н2 (б)</p>	 <p style="text-align: center;">$Q(t)=1-(1-t \cdot \lambda_{5,5}) \cdot (1-t \cdot \lambda_{5,6}) \cdot (1-t \cdot \lambda_{5,8}) \cdot (1-t \cdot \lambda_{5,9})$</p>	<p style="text-align: center;">$1,488 \cdot 10^{-6}$</p>

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3
14 Отказ: не выдается сигнал РИИ	$Q(t) = 1 - (1 - t \cdot \lambda_{5,12}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{30}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{29})$ 	1,283*10 ⁻⁶
15 Отказ: матрица состояния не соответствует значению «нормальная работа»	$Q(t) = t \cdot \lambda_{5,11}$ 	0,285*10 ⁻⁶
16 Отказ вследствие бита четности	$Q(t) = t \cdot \lambda_{5,10}$ 	0,255*10 ⁻⁶
17 Отказ: не функционирует схема контроля	$Q(t) = 1 - (1 - (1 - t \cdot \lambda_{4,22}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{4,23}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{4,24}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{4,33}))$ 	1,306*10 ⁻⁶
18 Отказ: функционирует схема отключения излучения	$Q(t) = t \cdot \lambda_{5,14}$ 	0,651*10 ⁻⁶
19 Отказ: вследствие адреса	$Q(t) = 1 - (1 - (1 - t \cdot \lambda_{5,5}) \cdot (1 - t \cdot \lambda_{5,9}))$ 	0,936*10 ⁻⁶

или по приближенному выражению:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (4.2)$$

где: Q_i – вероятность отказа i -го элемента за время t .

Последовательным соединением при расчете вероятности отказа системы является такое соединение элементов, при котором отказ хотя бы одного из них приводит к отказу системы в целом.

3) Вероятность вида отказа системы с резервированием элементов замещением рассчитывается по формуле:

$$Q(i) = (n_0 x Q_i)^{m+1} \quad (4.3)$$

где: Q_i – вероятность отказа i -го элемента за время t ; n_0 – количество элементов в основном канале; m – количество резервных каналов, находящихся в нагруженном режиме.

При расчете вероятностей отказов резервирующей системы предполагается, что время переключения отказавшего основного элемента на резервный и выдачи информации об отказах элементов в системе пренебрежимо мало

4) Для расчета вероятностей отказов использованы данные расчета надежности радиовысотомера А-053-08.

Интенсивность отказов функциональных узлов рассчитана по схемам электрическим принципиальным радиовысотомера А-053-08. (см. табл.4.3)

5) Выводы

В результате проведенного анализа функциональных отказов радиовысотомера А-053-08 получены результаты:

– вероятность отказа радиовысотомера А-053-08 равна $52,566 \cdot 10^{-6}$ (расчетная величина наработки на отказ равна 19023 ч – по ТЗ не менее 10000 л.ч на отказ);

– вероятность полного отказа системы из двух радиовысотомеров А-053-08 равна $2,762 \cdot 10^{-9}$;

– вероятность полного отказа системы из трех радиовысотомеров А-053-08 равна $1,452 \cdot 10^{-13}$;

– вероятность отказа выдачи выходных сигналов высоты Код Н1 (а) и Код Н1 (б) равна $1,488 \cdot 10^{-6}$;

– вероятность отказа выдачи сигнала РИИ равна $1,283 \cdot 10^{-6}$;

– вероятность отказа функционирования схемы контроля равна $1,306 \cdot 10^{-6}$;

– вероятность отказа функционирования схемы отключения излучения равна $0,651 \cdot 10^{-6}$.

б) Рекомендации к использованию при анализе следующей технической документации:

• ТЗ на опытно-конструкторскую работу «Разработка радиовысотомера для летательного аппарата» шифр «РВМ-95». Дополнение №2.

• Расчет надежности радиовысотомера А-053-08.

• Электрическая и функциональная схемы радиовысотомера А-053-08.

• Электрическая и функциональная схемы модуля АР-95-03.

- Электрическая и функциональная схемы ячеек ДН-052-01, ЛА-053-01, ИГ-053-02, ИХ-053-04.

В приложении Г представлена оценка безопасности приемного модуля аэродромного обзорного радиолокатора АОРЛ-85.

Список первоисточников

1. ГОСТ 27.301-95. Расчет надежности. Основные положения. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002г. 16 с. (Надежность в технике)
2. ГОСТ 27.003-2016. Состав и общие правила задания требований по надежности. М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2018г. 23 с. (Надежность в технике)
3. ГОСТ 27.102-2021. Надежность объекта. Термины и определения. М.: Российский институт стандартизации, 2021г. 36 с. (Надежность в технике)
4. РУКОВОДСТВО № 4761 по методам оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации. 2010г. МАК, Авиационный регистр. М: «Авиаиздат» 2011г. 266с.

Приложение А

Методы расчета надежности и общие рекомендации по их применению

А.1 Методы прогнозирования надежности

1.1 Методы прогнозирования применяют:

- для обоснования требуемого уровня надежности объектов при разработке технических заданий и/или оценки вероятности достижения заданных ПН при проработке технических предложений и анализе требований ТЗ (контракта). Пример соответствующих методов прогнозирования ремонтпригодности объектов содержится в МР 252-87;

- для ориентировочной оценки ожидаемого уровня надежности объектов на ранних стадиях их проектирования, когда отсутствует необходимая информация для применения других методов расчета надежности. Пример методики прогнозирования показателей безотказности блоков радиоэлектронной аппаратуры в зависимости от ее назначения и числа примененных в ней элементов (групп активных элементов) содержится в американском военном стандарте MIL-STD-756A;

- для расчета интенсивностей отказов серийно выпускаемых и новых электронных и электротехнических элементов разных типов с учетом уровня их нагруженности, качества изготовления, областей применения аппаратуры, в которой используются элементы. Примеры соответствующих методик содержатся в американском военном справочнике MIL-HDBK-217 и отечественных справочниках по надежности ИЭТ общепромышленного и специального назначения;

- для расчета параметров типовых задач и операций технического обслуживания и ремонта объектов с учетом конструктивных характеристик объекта, определяющих его ремонтпригодность. Примеры соответствующих методик содержатся в МР 252-87 и американском военном справочнике MIL-HDBK-472.

1.2 Для прогнозирования надежности объектов применяют:

- методы эвристического прогнозирования (экспертной оценки);
- методы прогнозирования по статистическим моделям;
- комбинированные методы.

Методы эвристического прогнозирования основаны на статистической обработке независимых оценок значений ожидаемых ПН разрабатываемого объекта (индивидуальных прогнозов), даваемых группой квалифицированных специалистов (экспертов) на основе предоставленной им информации об объекте, условиях его эксплуатации, планируемой технологии изготовления и других данных, имеющихся в момент проведения оценки. Опрос экспертов и статистическую обработку индивидуальных прогнозов ПН проводят общепринятыми при экспертной оценке любых показателей качества методами (например, метод Дельфи).

Методы прогнозирования по статистическим моделям основаны на экстра- или интерполяции зависимостей, описывающих выявленные тенденции изменения ПН объектов-аналогов с учетом их конструктивно-технологических особенностей и других факторов, информация о которых для разрабатываемого объекта известна или может быть получена в момент проведения оценки. Модели для прогнозирования строят по данным о ПН и параметрах объектов-аналогов с использованием известных статистических методов (многофакторного регрессионного или факторного анализа, методов статистической классификации и распознавания образов).

Комбинированные методы основаны на совместном применении для прогнозирования надежности объектов методов прогнозирования по статистическим моделям и эвристических методов с последующим сравнением результатов. При этом эвристические методы используют для оценки возможности экстраполяции используемых статистических моделей и уточнения прогноза по ним ПН. Применение комбинированных методов целесообразно в случаях, когда есть основания ожидать качественных изменений уровня надежности объектов, не отражаемых соответствующими статистическими

моделями, или при недостаточном для применения только статистических методов числе объектов-аналогов.

А.2 Структурные методы расчета надежности

2.1 Структурные методы являются основными методами расчета показателей безотказности, ремонтпригодности и комплексных ПН в процессе проектирования объектов, поддающихся разукрупнению на элементы, характеристики надежности которых в момент проведения расчетов известны или могут быть определены другими методами (прогнозирования, физическими, по статистическим данным, собранным в процессе их применения в аналогичных условиях). Эти методы применяют также для расчета долговечности и сохраняемости объектов, критерии предельного состояния которых выражаются через параметры долговечности (сохраняемости) их элементов.

2.2 Расчет ПН структурными методами в общем случае включает:

- представление объекта в виде структурной схемы, описывающей логические соотношения между состояниями элементов и объекта в целом с учетом структурно-функциональных связей и взаимодействия элементов, принятой стратегии обслуживания;
- видов и способов резервирования и других факторов;
- описание построенной структурной схемы надежности (ССН) объекта адекватной математической моделью, позволяющей в рамках введенных предположений и допущений вычислить ПН объекта по данным о надежности его элементов в рассматриваемых условиях их применения.

2.3 В качестве структурных схем надежности могут применяться:

- структурные блок-схемы надежности, представляющие объект в виде совокупности определенным образом соединенных (в смысле надежности) элементов (стандарт МЭК 1078);
- деревья отказов объекта, представляющие графическое отображение причинно-следственных связей, обуславливающих определенные виды его отказов (стандарт МЭК 1025);
- графы (диаграммы) состояний и переходов, описывающих возможные состояния объекта и его переходы из одного состояния в другое в виде совокупности состояний и переходов его элементов.

2.4 Математические модели, применяемые для описания соответствующих ССН, определяются видами и сложностью указанных структур, принятыми допущениями относительно видов законов распределения характеристик надежности элементов, точностью и достоверностью исходных данных для расчета и другими факторами.

Ниже рассмотрены наиболее употребительные математические методы расчета ПН, что не исключает возможности разработки и применения других методов, более адекватных структуре и другим особенностям объекта.

2.5 Методы расчета безотказности невосстанавливаемых объектов вида I (по классификации объектов в соответствии с ГОСТ 27.003)

Как правило, для описания безотказности таких объектов применяют блок схемы безотказности, правила, составления и математического описания которых установлены МЭК 1078. В частности, указанным стандартом установлены:

- методы прямого расчета вероятности безотказной работы объекта (ВБР) по соответствующим параметрам безотказности элементов для простейших параллельно-последовательных структур;
- методы расчета ВБР для более сложных структур, относящихся к классу монотонных, включая метод прямого перебора состояний, метод минимальных путей и сечений, метод разложения относительно любого элемента.

Для расчета показателей типа средней наработки объекта до отказа в указанных методах используют метод прямого или численного интегрирования распределения наработки до отказа объекта, представляющего композицию соответствующих

распределений наработок до отказа его элементов. Если информация о распределении наработок до отказа элементов неполна или недостоверна, то применяют различные граничные оценки ПН объекта, известные из теории надежности [1–4].

В частном случае невозстанавливаемой системы с различными способами резервирования и при экспоненциальном распределении наработок до отказа элементов применяют ее структурное отображение в виде графа переходов и его математическое описание с помощью марковского процесса.

При использовании для структурного описания безотказности деревьев отказов в соответствии с МЭК 1025 вероятности соответствующих отказов рассчитывают с использованием булева представления дерева отказов и метода минимальных сечений.

2.6 Методы расчета безотказности и комплексных ПН восстанавливаемых объектов вида I.

Универсальным методом расчета для объектов любой структуры и при любых сочетаниях распределений наработок между отказами и времен восстановления элементов, при любых стратегиях и методах восстановления и профилактики служит метод статистического моделирования, в общем случае включающий [3]:

- синтез формальной модели (алгоритма) формирования последовательности случайных событий, происходящих в процессе работы объекта (отказов, восстановлений, переключений на резерв, начала и конца технического обслуживания);

- разработку программного обеспечения для реализации на ЭВМ составленного алгоритма и расчета ПН объекта;

- проведение имитационного эксперимента на ЭВМ путем многократной реализации формальной модели, обеспечивающей требуемую точность и достоверность

- расчета ПН.

Метод статистического моделирования для расчета надежности применяют при отсутствии адекватных аналитических моделей из числа рассматриваемых ниже.

Для резервированных последовательных структур с восстановлением и произвольными способами резервирования элементов применяют марковские модели для описания соответствующих графов (диаграмм) состояний.

В некоторых случаях для объектов с неэкспоненциальными распределениями наработок и времени восстановления немарковская задача расчета ПН может быть сведена к марковской путем введения определенным способом фиктивных состояний объекта в его граф переходов.

Другой эффективный метод расчета ПН объектов с резервом основан на представлении наработок их между отказами в виде суммы случайного числа случайных слагаемых и непосредственном вычислении ПН объектов без привлечения методов теории случайных процессов.

2.7 Методы расчета показателей ремонтпригодности

Методы расчета показателей ремонтпригодности в общем случае основаны на представлении процесса ТО или ремонта определенного вида как совокупности отдельных задач (операций), вероятности и цели выполнения которых определяются показателями безотказности (долговечности) объектов и принятой стратегией ТО и ремонта, а продолжительность (трудоемкость, стоимость) выполнения каждой задачи зависит от конструктивной приспособленности объекта к ТО (ремонту) данного вида.

В частности, при расчете показателей ремонтпригодности объектов при текущем неплановом ремонте распределение времени (трудоемкости, стоимости) его восстановления представляет композицию распределений затрат на отдельные задачи восстановления с учетом ожидаемой вероятности выполнения каждой задачи за некоторый период работы объекта. Указанные вероятности могут быть рассчитаны, например, с помощью деревьев отказов, а параметры распределения затрат на выполнение отдельных задач рассчитывают одним из методов, установленных, например, МР 252-87 (нормативно-коэффициентным, по регрессионным моделям и др.).

Общая схема расчета включает:

- составление (например, методами АВПКО по ГОСТ 27.310) перечня возможных отказов объекта и оценку их вероятностей (интенсивностей);
- отбор из составленного перечня методом расслоенной случайной выборки некоторого достаточно представительного числа задач и расчет параметров распределений их продолжительности (трудоемкости, стоимости). В качестве таких распределений обычно используют усеченное нормальное или альфа-распределение;
- построение эмпирического распределения затрат на текущий ремонт объекта путем сложения с учетом вероятностей отказов распределений затрат на отдельные задачи и его сглаживание с помощью соответствующего теоретического распределения (логарифмически-нормального или гамма-распределения);
- вычисление показателей ремонтпригодности объекта по параметрам выбранного закона распределения.

2.8 Методы расчета показателей надежности объектов вида II (по классификации ГОСТ 27.003)

Для объектов данного вида применяют ПН типа “коэффициент сохранения эффективности” ($K_{эф}$), при расчете которого сохраняются общие принципы расчета надежности объектов вида I, но каждому состоянию объекта, определяемому совокупностью состояний его элементов или каждой возможной его траектории в пространстве состояний элементов, должно быть поставлено в соответствие определенное значение доли сохраняемой номинальной эффективности от 0 до 1 (для объектов вида I эффективность в любом состоянии может принимать только два возможных значения: 0 или 1).

Существует два основных метода расчета $K_{эф}$:

- *метод усреднения по состояниям* (аналог метода прямого перебора состояний), применяемый для объектов кратковременного действия, выполняющих задачи, продолжительность которых такова, что вероятностью изменения состояния объекта в процессе выполнения задачи можно пренебречь и учитывать только его начальное состояние;

- *метод усреднения по траекториям*, применяемый для объектов длительного действия, продолжительность выполнения задач которыми такова, что нельзя пренебречь вероятностью смены состояний объекта при их выполнении за счет отказов и восстановлений элементов. При этом процесс функционирования объекта описывается реализацией одной из возможных траекторий в пространстве состояний.

Известны также некоторые частные случаи расчетных схем для определения $K_{эф}$, применяемые для систем с определенными видами функции эффективности, например:

- системы с аддитивным показателем эффективности, каждый элемент которых вносит определенный независимый вклад в выходной эффект от применения системы;
- системы с мультипликативным показателем эффективности, получаемым как произведение соответствующих показателей эффективности подсистем;
- системы с резервированием функций;
- системы, выполняющие задачу несколькими возможными способами с использованием различных сочетаний элементов, участвующих в выполнении задачи каждым из них;
- симметричные ветвящиеся системы;
- системы с пересекающимися зонами действия и др.

Во всех перечисленных выше схемах $K_{эф}$ системы представляют функцией $K_{эф}$ ее подсистем или ПН элементов.

Наиболее принципиальным моментом в расчетах $K_{эф}$ является оценка эффективностей системы в различных состояниях или при реализации различных траекторий в пространстве состояний, проводимая аналитически, или методом

моделирования, или экспериментальным путем непосредственно на самом объекте или его натуральных моделях (макетах).

А.3 Физические методы расчета надежности

3.1 Физические методы применяют для расчета безотказности, долговечности и сохраняемости объектов, для которых известны механизмы их деградации под влиянием различных внешних и внутренних факторов, приводящие к отказам (предельным состояниям) в процессе эксплуатации (хранения).

3.2 Методы основаны на описании соответствующих процессов деградации с помощью адекватных математических моделей, позволяющих вычислять ПН с учетом конструкции, технологии изготовления, режимов и условий работы объекта по справочным или определенным экспериментально физическим и иным свойствам веществ и материалов, используемых в объекте.

В общем случае указанные модели при одном ведущем процессе деградации могут быть представлены моделью выбросов некоторого случайного процесса за пределы границ допустимой области его существования, причем границы этой области могут быть также случайными и коррелированными с указанным процессом (моделью превышения).

При наличии нескольких независимых процессов деградации, каждый из которых порождает свое распределение ресурса (наработки до отказа), результирующее распределение ресурса (наработки объекта до отказа) находят с использованием модели «слабейшего звена» (распределение минимума независимых случайных величин).

3.3 Компоненты моделей превышения могут иметь различную физическую природу и, соответственно, описываться разными видами распределений случайных величин (случайных процессов), а также могут быть в моделях накопления повреждений. Этим обусловлено большое разнообразие применяемых на практике моделей превышения, причем лишь в относительно редких случаях эти модели допускают прямое аналитическое решение. Поэтому основным методом расчета надежности по моделям превышения является статистическое моделирование.

Приложение Б

Базовые интенсивности отказов различных типов ЭРИ

Таблица Б.1 – Базовые интенсивности отказов различных типов ЭРИ

Группа ЭРИ	$\lambda_B, \times 10^{-6} \text{ 1/ч}$
1	2
1 Интегральные микросхемы (ИМС)	
Полупроводниковые цифровые:	
логические, арифметические, микропроцессоры и микропроцессорные комплекты, регистры сдвига и др.	0,023
оперативные запоминающие устройства (ОЗУ)	0,030
постоянные запоминающие устройства (ПЗУ, ППЗУ, РИЗУ)	0,018
Полупроводниковые аналоговые	0,028
Гибридные ИМС	0,043
2 Полупроводниковые приборы (ППП)	
Диоды выпрямительные	0,091
Столбы (мосты) выпрямительные	0,21
Диоды импульсные	0,025
Варикапы подстроечные	0,022
Стабилитроны	0,0041
Транзисторы биполярные кремниевые, кроме СВЧ	0,044
Транзисторы полевые:	
кремниевые	0,065
арсенидогаллиевые	0,578
Тиристоры кремниевые	0,2
Диоды СВЧ:	
кремниевые (кроме умножительных и настроечных)	0,162
кремниевые умножительные и настроечные	1,61
арсенидогаллиевые	0,21
Транзисторы СВЧ малой и средней мощности	0,064
Транзисторы СВЧ большой мощности	0,18
3 Оптоэлектронные полупроводниковые приборы	
Фотодиоды на основе кремния	0,185
Фототранзисторы	0,15
Фоторезисторы на основе <i>PbS</i>	1,8
Диоды излучающие ИК и видимого диапазона (светодиоды)	0,034
Оптопары диодные, транзисторные	0,051
Оптопары тиристорные, резисторные, микросхемы оптоэлектронные	0,19
4 Знакосинтезирующие индикаторы	
Индикаторы полупроводниковые	
буквенно-цифровые	0,42
дисплеи с диодной матрицей	0,21
Индикаторы вакуумные люминесцентные:	
цифровые	0,83
буквенно-цифровые	0,69
Индикаторы вакуумные накаливаемые цифровые	0,31
Индикаторы газоразрядные:	
цифровые	0,79
буквенно-цифровые	2,25
Индикаторы жидкокристаллические цифровые многоразрядные	0,88
5 Конденсаторы	

Группа ЭРИ	$\lambda_B, \times 10^{-6} 1/ч$
1	2
Слюдяные	0,04
Керамические	0,022
Бумажные и металлобумажные	0,019
С органическим синтетическим диэлектриком	0,028
Электролитические алюминиевые	0,173
6 Резисторы	
Резисторы постоянные непроволочные:	
металлодиэлектрические, металлизированные	0,044
композиционные	0,034
Терморезисторы	0,007
Резисторы переменные:	
непроволочные	0,179
проволочные	0,183
7 Элементы коммутации	
Переключатели галетные	0,058
Тумблеры	0,1
Кнопки, кнопочные переключатели	0,16
Микропереключатели	0,045
Переключатели на базе герконов	0,13
Контакты магнитоуправляемые:	
замыкающего типа	0,0007
переключающего типа	0,018
8 Соединители (разъемы)	
Низкочастотные прямоугольные для печатного монтажа	0,0041
Низкочастотные для объёмного монтажа	0,0104
Радиочастотные с полиэтиленовой изоляцией	0,015
9 Прочие элементы и компоненты	
Трансформаторы:	
питания	0,0035
преобразователи напряжения	0,0072
согласующие, импульсные и др.	0,0019
Электронно-лучевые трубки:	
осциллографические, индикаторные	1,67
кинескопы монохромные	1,1
кинескопы цветные	13,17
Дроссели	0,033
Катушки индуктивности	0,01
Реле электромагнитные общего назначения	0,0304(1/ком.)
Пьезоэлектрические приборы (кварцевые резонаторы, датчики, фильтры)	0,026
Линии задержки	0,04
Предохранители	0,011
Держатели предохранителей	0,003
Индикаторные электрические лампочки при минимальной продолжительности горения T_{min} , указываемой в ТУ:	
при переменном напряжении до 12 В	1,8
при постоянном напряжении до 12 В	5,4
при переменном напряжении 200...240 В	77,8
Соединения (значения базовой интенсивности отказов):	
ручная пайка без накрутки	0,0013

Группа ЭРИ	$\lambda_{\text{Б}}, \times 10^{-6} \text{ 1/ч}$
1	2
ручная пайка с накруткой	0,00007
пайка волной	0,000069
обжимка (опрессовка)	0,00012
клеммный блок (узел)	0,062
Пайки сквозных металлизированных отверстий в платах с металлизированными отверстиями:	
печатный монтаж	0,000017
монтаж дискретными проводниками	0.00011
Кабели, шнуры, провода монтажные (значения базовой интенсивности отказов):	
кабели (провода) радиочастотные коаксиальные	0,00127 (1/м)
провода монтажные низковольтные обычной теплостойкости	0,0577 (1/м)
шнуры питания гибкие (без вилок питания)	0.037 (1/м)

Приложение В

Типовые времена восстановления радиоэлементов

Таблица В.1 – Типовые времена восстановления радиоэлементов

Наименование элементов	Т рем, ч
Полупроводниковые приборы	1,2
Резисторы	0,8
Конденсаторы	1,0
Катушки индуктивности, дроссели	1,3
Трансформаторы	1,5
Реле	1,9
Переключатели	0,7
Электродвигатели	3,8
Кварцы	0,5
Сигнальные лампы	0,08
Колесательные контуры, фазовращатели, резонаторы	1,2
Предохранители	0,06
Ламповые панели, клеммы, разъемы	1,9
Платы с невосстанавливаемыми элементами	1,5
Невосстанавливаемые узлы	1,2

Приложение Г

Оценка безопасности приемного тракта АОРЛ-85

Г.1 Описание аэродромного обзорного радиолокатора

АОРЛ-85 (рис. Г.1) предназначен для осуществления диспетчерами контроля и управления воздушным движением самолетов ГА в районе аэродромов со средней и малой интенсивностью полетов, а также может быть использован в качестве резервного средства для АС УВД в указанной зоне.

АОРЛ обеспечивает:

- прием, обработку и преобразование радиолокационной информации, получаемой по первичному и вторичному каналам;
- трансляция радиолокационной информации в цифровом и аналоговом виде по широкополосной и кабельной линиям на КДП на расстояние до 3 км;
- отображение аналоговой информации первичного и вторичного каналов на экране контрольного индикатора кругового обзора;
- дистанционное управление работой АОРЛ с использованием аппаратуры ТУ-ТС по проводам с КДП.



Рисунок Г.1 – Внешний вид АОРЛ-85

АОРЛ-85 размещается вблизи контрольной точки аэродрома (КТА). При установке на позиции аппаратный и агрегатный контейнеры ориентируются таким образом, чтобы антенны РЛС не затеняли друг друга в направлении основных обслуживаемых направлений полетов. Расстояние между кузовами составляет до 27 м. Расстояние до КДП по прямой видимости не должно превышать 3 км.

Для сохранения точностных характеристик по вторичному каналу (ВК) и получения минимального числа ложных запросов от отражателей необходимо выполнение следующих условий:

- в радиусе 100 м все сооружения и антенны должны быть ниже линии, проведенной от нижней кромки антенны ВК под углом минус 5 градусов:

- крупногабаритные сооружения (к которым не относится второй комплект АОРЛ), находящиеся на расстоянии от 100 до 600 м, должны быть высотой не более 3,5 м, причем желательно, чтобы в зоне трасс не было вертикальных отражений от поверхностных сооружений. Мачты и эстакады должны находиться на удалении более 600 м.

Дальность действия первичного канала РЛС при углах закрытия не более 10 минут и вероятности правильного обнаружения $P_{обн} = 0,8$ составляет (зависимости от высоты):

Высота (м)	Дальность (км)
1200	6-65
3600	10-80
6000	12-100

Основные тактико-технические характеристики радиолокатора представлены в таблице Г.1.

Таблица Г.1 – Основные тактико-технические характеристики

№ п/п	Наименование характеристики	Значение
1	Минимальная дальность обнаружения по первичному и вторичному каналам на высоте 400 м	более 3 км
2	Точность измерения координат с выхода АПОИ:	
	по дальности	не более 250 м
	по азимуту	не более 15 градусов
3	Разрешающая способность с выхода АПОИ	
	по дальности	не более 1000 м
	по азимуту	не более 9 градусов
4	Темп обзора зоны действия	6 сек (10 об/мин)
5	Коэффициент подпомеховой видимости	18 дБ
6	Зона действия СДЦ при $V_{BC}=40 \dots 1500$ км/ч	не более 50 км
7	Время перехода с комплекта на комплект	Не более 7 мин
8	Питание от 4-х проводной сети	380 В \pm 38 50 Гц
9	Допустимая скорость ветра	
	Рабочая	25 м/сек
	Флюгерная	50 м/сек
10	Среднее время наработки на отказ	не менее 7000 ч
11	Среднее время восстановления	не более 1 час
12	Ресурс	80 000 час
13	Срок службы	10 лет

Г.2 Принцип работы АОРЛ-85 по структурной схеме

Импульсы запуска из блока синхронизации и сопряжения первичного канала (рис. Г.2) поступают в блок устройства преобразования и фильтрации (УПФ) приёмного устройства соответствующего комплекта, где формируется радиочастотный сигнал длительностью 29 мкс с внутримпульсной линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). ЛЧМ сигнал поступает на вход передатчика первичного канала на предварительный усилитель мощности передатчика, в качестве которого использована лампа бегущей волны средней мощности. В последних выпусках РЛС предварительный усилитель построен на лампах ГМИ-46. Выходной усилитель мощности СВЧ передатчика выполнен на амплитроне МИУ-76 или МИУ-90. Усиленный зондирующий сигнал через антенный переключатель на ферритовом циркуляторе поступает в антенну.

канала ПРМ ПК, где он преобразуется на промежуточную частоту 20 МГц, усиливается и сжимается в оптимальном фильтре по длительности до величины примерно 3 мкс. При сжатии амплитуда полезного сигнала увеличивается относительно уровня шумов примерно в 8 раз по мощности.

Далее полезный сигнал на промежуточной частоте поступает на вход системы СДЦ, где проходит обработку в схеме двукратной ЧПК на приборах с зарядной связью. В результате обработки выделяются сигналы от движущихся целей и подавляются сигналы от местных предметов и низкоскоростных метеообразований.

Источником электропитания АОРЛ является промышленная сеть 380 В 50 ГЦ. В состав АОРЛ-85 входят два преобразователя ПСЧ-15, обеспечивающие питание АОРЛ от промышленной сети 380/220 в 50 Гц.

Г.3 Приемное устройство первичного канала

Приемное устройство первичного канала предназначено для:

- усиления и преобразования принятых высокочастотных сигналов от коммутирующих антенных систем верхних и нижних углов;
- формирования сигналов с ЛЧМ для возбуждения передающих устройств первичного канала;
- подавление несинхронных помех от неподвижных и малоскоростных целей;
- обработка видеосигналов фазового и амплитудных каналов и выдачу их на устройства отображения информации;
- синхронизация комплектов УОВС и шкафа синхронизации.

Основные технические характеристики представлены в таблице Г.2

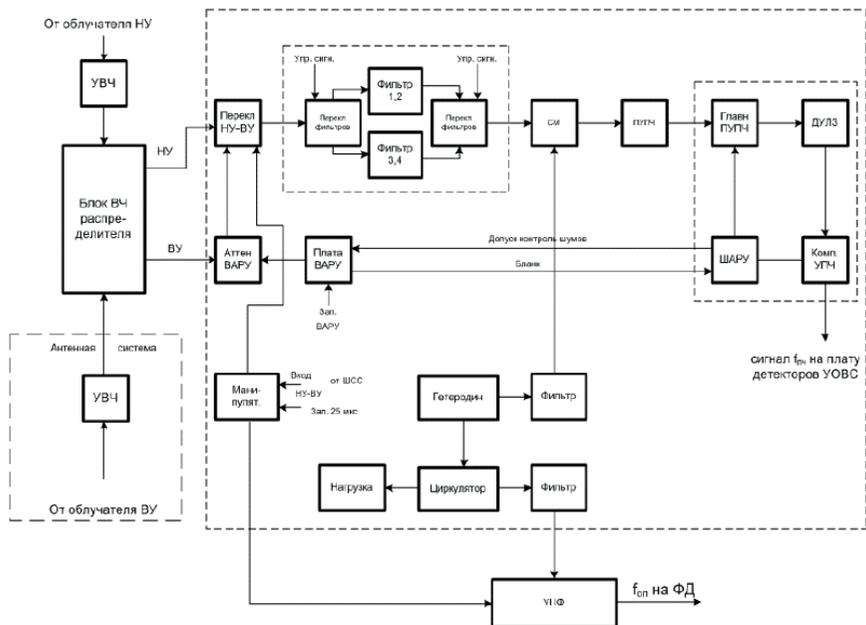
Таблица Г.2 – Технические характеристики приемного устройства

Параметр	Значение
Чувствительность приёмного устройства: режим МОНО режим ЛЧМ	минус 137 дБ / Вт минус 140 дБ / Вт
Избирательность по зеркальному каналу	не менее 60 дБ;
Коэффициент подавления в режиме двукратной ЧПК	не менее 24 дБ
Динамический диапазон по выходу амплитудного и когерентного каналов	не менее 16 дБ

Приёмное устройство ПК включает:

- УВЧ НУ, расположенный в установке СВЧ - прибора ПРД ПК;
- УВЧ ВУ, размещённый в антенной системе между облучателем ВУ и ЧРУ;
- шкаф приёмного устройства ПК;
- блок приёмника ПК;
- устройство преобразования и фильтрации (УПФ);
- устройство обработки видеосигналов (УОВС).

Приемное устройство ПК выполнено по супергетеродинной схеме с однократным преобразованием частоты (рис. Г.3). Эхо-сигналы от облучателей НУ и ВУ обоих полуккомплектов радиолокатора после усиления в УВЧ поступают в блок ВЧ разделения (БВЧР). Со второго полуккомплекта АОРЛ-85 сигналы с трактов НУ и ВУ поступают в свой БВЧ по 40 – метровым коаксиальным кабелям и усиливаются компенсирующими усилителями.



Рисунки Г.3 – Приёмник ПК. Схема электрическая структурная

Усилители высокой частоты каналов НУ и ВУ идентичны и выполнены в виде транзисторного модуля. Коэффициент усиления УВЧ составляет 17 дБ. Максимально допустимая мощность СВЧ колебаний на входе УВЧ 2 мВт. Для защиты УВЧ установлены ограничители, снижающие уровень входного сигнала до допустимых значений. Далее сигналы трактов НУ и ВУ поступают в идентичные шкафы своего полуконспекта, на блоки ПРМ ПК, где объединяются на переключателях НУ-ВУ и подаются на преселектор. При этом сигнал ВУ проходит через аттенуатор ВАРУ, предназначенный для улучшения условий работы приёмника в ближней зоне в условиях сильных отражений от местных предметов.

Аттенуатор ВАРУ изменяет своё затухание в соответствии с управляющим напряжением, вырабатываемым платой ВАРУ. Переключатель ВУ-НУ управляется манипулятором. В ближней зоне (0... 50 км с дискретностью 10 км) вход приёмника подключается к тракту ВУ, а за пределами зоны на вход приёмника подаются сигналы НУ. Манипулятор, кроме того, управляет работой ВЧ переключателя, подключающего гетеродин к УПФ, и является ключевым усилителем тока управляющих сигналов. Выход переключателя нагружен на полосовые фильтры, смена номера фильтра производится выбором соответствующей кнопки канала.

Далее сигналы преобразуются по частоте в смесителе, и дальнейшее усиление происходит в усилителе промежуточной частоты. В УПЧ происходит сжатие ЛЧМ - сигнала длительностью 25 мкс по времени в узкие радиоимпульсы длительностью около 3 мкс.

На УПФ подаются сигналы гетеродина и запускающие импульсы. Под воздействием этих сигналов в УПФ вырабатываются радиоимпульсы длительностью 29 мкс с внутриимпульсной линейной частотной модуляцией и радиоимпульсы МОНО, длительностью 6 мкс. Кроме того, в УПФ вырабатываются колебания опорной промежуточной частоты 20 МГц, которые подаются на фазовые детекторы блока УОВС.

Управление работой приёмного устройства может осуществляться как дистанционно, так и с передней панели блока приёмника.

Преселектор обеспечивает избирательность по зеркальному каналу не менее 60 дБ и выполнен в виде двух узкополосных фильтров (фильтр 1,2 для 1 и 2 частотных каналов, и фильтр 3,4 для 3 и 4 частотных каналов). Переключение фильтров осуществляется с помощью переключателей на входе и на выходе. ПУПЧ представляет собой двухкаскадный усилитель на транзисторах. Нагрузкой первого каскада является четырёхзвенный фильтр сосредоточенной селекции (ФСС). Второй каскад является широкополосным, имеет небольшое усиление и обеспечивает согласование с волновым сопротивлением кабеля, соединяющего ПУПЧ и УПЧ. Коэффициент усиления ПУПЧ составляет 20 дБ, полоса пропускания $(3 \pm 0,5)$ МГц.

Усилитель промежуточной частоты имеет коэффициент усиления 80 дБ, полосу пропускания 2 МГц и содержит главный УПЧ, фильтр сжатия на ДУЛЗ, компенсирующий УПЧ и схему ШАРУ. Главный УПЧ служит для основного усиления ЛЧМ - сигнала и состоит из пятикаскадного усилителя на транзисторах и контрольного детектора. Каскады УПЧ собраны по каскадной схеме ОК-ОЭ с гальванической связью между транзисторами. Эмиттерный повторитель, стоящий на входе каждого каскада, обеспечивает устойчивость усиления и настройки при различных дестабилизирующих факторах.

Г.4 Реализация разработанной методики на примере приемного канала АОРЛ-85

Г.4.1 Дерево функций ПРМ АОРЛ-85

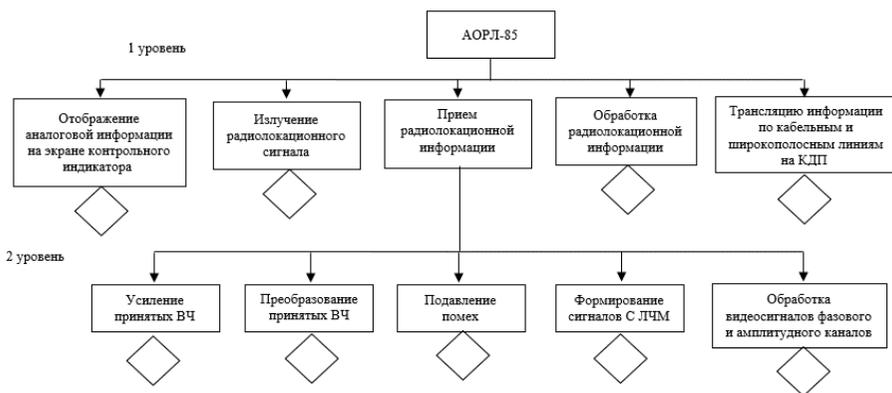


Рисунок Г.4 – Дерево функций ПРМ АОРЛ-85

Г.4.2 Определение отказных состояний ПРМ АОРЛ-85

Анализируемыми функциями приемного канала являются:

1. Усиление принятых ВЧ сигналов;
2. Преобразование принятых ВЧ сигналов;
3. Подавление помех;
4. Формирование сигналов с ЛЧМ;
5. Обработка видеосигналов фазового и амплитудного канала.

Влияние состояния отказа на диспетчера управления воздушным движением (УВД) и экипаж ВС.

Для каждого условия отказа его влияние на диспетчера УВД и экипаж ВС показаны в столбце (4) таблицы Г.3. Для каждого условия отказа его классификация определена в столбце (5). Для каждого условия отказа план проверки безопасности определен в столбце (6). В этом столбце перечислены ссылки на деревья отказов.

Г. 4.3 Предварительная оценка безопасности ПРМ АОРЛ-85

Требования по безопасности, выдвигаемые для ПРМ АОРЛ-85, основанные на результате ОФО системы и таблице интенсивности отказов.

Вероятность потери функции усиления принятых ВЧ сигналов должна быть не менее 10^{-6} на час работы. Вероятность потери функции преобразования принятых ВЧ сигналов должна быть не менее 10^{-6} на час работы. Вероятность потери функции подавления помех должна быть не менее 10^{-6} на час работы. Вероятность потери функции формирования сигналов с ЛЧМ должна быть не менее 10^{-6} на час работы. Вероятность потери функции обработки видеосигналов фазового и амплитудного канала должна быть не менее 10^{-6} на час работы.

По функциям системы, приведенным в таблице Г.3, столбец (1), построены деревья отказов.

Пример расчета дерева отказов для функции преобразования принятых ВЧ сигналов представлен на рисунках Г.5 – Г.6.

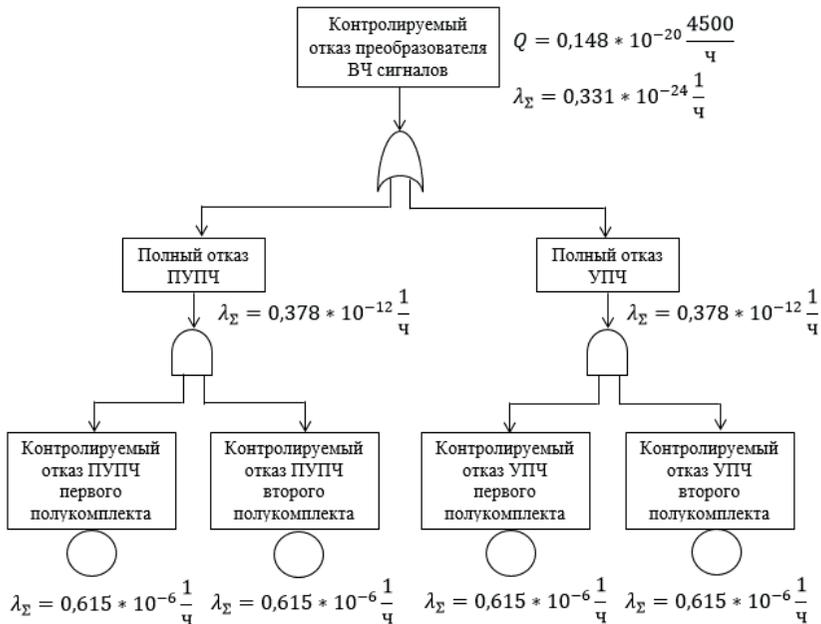


Рисунок Г.5 – Контролируемый отказ преобразователя ВЧ сигналов

Таблица Г.3 – Оценка функциональной опасности ПРМ АОРЛ-85

Функция	Условия отказа (описание опасности)	Фаза	Влияние условия отказа на диспетчера УВД и экипаж ВС	Классификация	Обновление
1	2	3	4	5	6
1. Усиление принятых ВЧ сигналов	1.1. Отказ УВЧ НУ	На всех высотах в районе аэродрома от +2° до +45°	<ol style="list-style-type: none"> Отказ радиолокатора. Продолжение полета, переход на второй полукомплект радиолокатора и (или) использование информации от других систем наблюдения (АЗН-В). Нет увеличения нагрузки диспетчера УВД ($K_{\Sigma} \leq 0,55$) и экипажа ВС. 	Нет влияния на безопасность полетов	Рис.
	1.2. Не контролируемый отказ УВЧ НУ	На всех высотах в районе аэродрома от +2° до +45°	<ol style="list-style-type: none"> Уменьшение дальности обнаружения (при заданных значениях вероятности правильного обнаружения $P_{обл} = 0,99$). Продолжения полета, отсутствие перехода на второй полукомплект радиолокатора. Возможное использование информации от других систем наблюдения (АЗН-В) Значительное увеличение нагрузки диспетчера УВД ($K_{\Sigma} \leq 0,6$) и экипажа ВС. 	Значительное	ДН
	1.3 Отказ УВЧ ВУ	На всех высотах в районе аэродрома от +10° до +45°	<ol style="list-style-type: none"> Отказ радиолокатора. Продолжение полета, переход на второй полукомплект радиолокатора и (или) использование информации от других систем наблюдения (АЗН-В). Нет увеличения нагрузки диспетчера УВД ($K_{\Sigma} \leq 0,55$) и экипажа ВС 	Нет влияния на безопасность полетов	ДН
	1.4 Не контролируемый отказ УВЧ ВУ	На всех высотах в районе аэродрома	<ol style="list-style-type: none"> Уменьшение высоты обнаружения (при заданных значениях вероятности правильного обнаружения $P_{обл} = 0,99$). Продолжения полета, отсутствие перехода на второй полукомплект радиолокатора. Возможное использование информации от других систем наблюдения (АЗН-В) 	Значительное	ДН

Функция	Условия отказа (описание опасности)	Фаза	Влияние условия отказа на диспетчера УВД и экипаж ВС	Классификация	Обоснование
1	2	3	4	5	6
		от +10° до +45°	3. Значительное увеличение нагрузки диспетчера УВД (К ₃ ≤0.6) и экипажа ВС.		
	2.1 Отказ ПУПЧ	На всех высотах в районе аэродрома	1. Отказ радиолокатора. 2. Продолжение полета, переход на второй полукомплект радиолокатора и (или) использование информации от других систем наблюдения (АЗН-В). 3. Нет увеличения нагрузки диспетчера УВД (К ₃ ≤0,55) и экипажа ВС	Нет влияния на безопасность полетов	ДН
2. Преобразование принятых ВЧ сигналов					
	2.2 Не контролируемый отказ ПУПЧ	На всех высотах в районе аэродрома	1. Отсутствие ПУ и селекции, ухудшение отношения С/Ш, падение коэффициента усиления, уменьшение вероятности правильного обнаружения. 2. Продолжения полета, отсутствие перехода на второй полукомплект радиолокатора. Возможное использование информации от других систем наблюдения (АЗН-В) 3. Значительное увеличение нагрузки диспетчера УВД (К ₃ ≤0.6) и экипажа ВС.	Значительное	ДН
	2.3 Отказ УПЧ	На всех высотах в районе аэродрома	1. Отказ радиолокатора. 2. Продолжение полета, переход на второй полукомплект радиолокатора и (или) использование информации от других систем наблюдения (АЗН-В). 3. Нет увеличения нагрузки диспетчера УВД (К ₃ ≤0,55) и экипажа ВС	Нет влияния на безопасность полетов	ДН
	2.4 Не контролируемый отказ УПЧ	На всех высотах в районе аэродрома	1. Отсутствие усиление ЛЧМ сигнала на ПЧ, изменение уровня напряжения шумов на выходе УПЧ, уменьшение вероятности правильного обнаружения.	Значительное	ДН

Функция	Условия отказа (описание опасности)	Фаза	Влияние условия отказа на диспетчера УВД и экипаж ВС	Классификация	Обоснование
1	2	3	4	5	6
3. Подавление помех	3.1 Отказ узкополосных фильтров	На всех высотах в районе аэродрома	<p>2. Продолжения полета, отсутствие перехода на второй полукомплект радиолокатора. Возможное использование информации от других систем наблюдения (АЗН-В)</p> <p>3. Значительное увеличение нагрузки диспетчера УВД ($K_3 \leq 0.6$) и экипажа ВС.</p>	Нет влияния на безопасность полетов	ДН
	3.2 Не контролируемый отказ узкополосных фильтров	На всех высотах в районе аэродрома	<p>1. Потеря фильтрующих свойств фильтров А4, А5 из состава преселектора.</p> <p>Появление паразитных гармоник, искажение характеристики фильтров, что приведёт к увеличению влияния помех. Падение дальности обнаружения, возможное появление отметок о ложных ВС.</p> <p>2. Продолжения полета, отсутствие перехода на второй полукомплект радиолокатора. Возможное использование информации от других систем наблюдения (АЗН-В)</p> <p>3. Значительное увеличение нагрузки диспетчера УВД ($K_3 \leq 0.6$) и экипажа ВС.</p>	Значительное	ДН
	3.3 Отказ аттенуатора в ВАРУ	На всех высотах в районе аэродрома	<p>1. Отказ радиолокатора.</p> <p>2. Продолжение полета, переход на второй полукомплект радиолокатора и (или) использование информации от других систем наблюдения (АЗН-В).</p> <p>3. Нет увеличения нагрузки диспетчера УВД ($K_3 \leq 0.55$) и экипажа ВС</p>	Нет влияния на безопасность полетов	ДН

Функция	Условия отказа (описание опасности)	Фаза	Влияние условия отказа на диспетчера УВД и экипаж ВС	Классификация	Обоснование
1	2	3	4	5	6
	3.4 Не контролируемый отказ агтенуатора а ВАРУ	На всех высотах в районе аэродрома	1. Увеличение помех в ближней зоне в условиях сильных отражений от местных предметов. Возможное появление отмыток о ложных ВС. 2. Продолжения полета, отсутствие перехода на второй полукомплект радиолокатора. Возможное использование информации от других систем наблюдения (АЗН-В) 3. Значительное увеличение нагрузки диспетчера УВД ($K_3 \leq 0.6$) и экипажа ВС.	Значительное	ДН
4. Формирование сигналов с ЛЧМ	4.1 Отказ УПФ	На всех высотах в районе аэродрома	1. Отказ радиолокатора. 2. Продолжение полета, переход на второй полукомплект радиолокатора и (или) использование информации от других систем наблюдения (АЗН-В). 3. Нет увеличения нагрузки диспетчера УВД ($K_3 \leq 0.55$) и экипажа ВС	Нет влияния на безопасность полетов	ДН
	4.2 Не контролируемый отказ УПФ	На всех высотах в районе аэродрома	1. Отсутствие формирования импульсов с ЛЧМ, отсутствие возбуждения передающего устройства ПК, отсутствие формирования копии сигнала. Отсутствие получаемой информации о местоположении ВС. 2. Продолжения полета, отсутствие перехода на второй полукомплект радиолокатора. Возможное использование информации от других систем наблюдения (АЗН-В) 3. Значительное увеличение нагрузки диспетчера УВД ($K_3 \leq 0.6$) и экипажа ВС.	Значительное	ДН
5. Обработка видеосигналов фазового и	5.1 Отказ амплитудного канала	На всех высотах в районе аэродрома	1. Отказ радиолокатора. 2. Продолжение полета, переход на второй полукомплект радиолокатора и (или) использование информации от других систем наблюдения (АЗН-В). 3. Нет увеличения нагрузки диспетчера УВД ($K_3 \leq 0.55$) и экипажа ВС	Нет влияния на безопасность полетов	ДН

Функция	Условия отказа (описание опасности)	Фаза	Влияние условия отказа на диспетчера УВД и экипаж ВС	Классификация	Обоснование
1	2	3	4	5	6
амплитудного канала	5.2 Не контролируется амплитудного канала	На всех высотах в районе аэродрома	<p>1. Отсутствие декодирования и усиления сигнала, детектирование по амплитуде и усиление эхо – сигналов. Уменьшение вероятности правильного обнаружения.</p> <p>2. Продолжения полета, отсутствие перехода на второй полукомплект радиолокатора. Возможное использование информации от других систем наблюдения (АЗН-В)</p> <p>3. Значительное увеличение нагрузки диспетчера УВД ($K_3 \leq 0.6$) и экипажа ВС.</p>	Значительное	ДН
	5.3 Отказ фазового канала	На всех высотах в районе аэродрома	<p>1. Отказ радиолокатора.</p> <p>2. Продолжение полета, переход на второй полукомплект радиолокатора и (или) использование информации от других систем наблюдения (АЗН-В).</p> <p>3. Нет увеличения нагрузки диспетчера УВД ($K_3 \leq 0.55$) и экипажа ВС</p>	Нет влияния на безопасность полетов	ДН
	5.4 Не контролируется фазового канала	На всех высотах в районе аэродрома	<p>1. Отсутствие обработки видеосигналов с выходов фазовых детекторов. Уменьшение вероятности правильного обнаружения.</p> <p>2. Продолжения полета, отсутствие перехода на второй полукомплект радиолокатора. Возможное использование информации от других систем наблюдения (АЗН-В)</p> <p>3. Значительное увеличение нагрузки диспетчера УВД ($K_3 \leq 0.6$) и экипажа ВС.</p>	Значительное	ДН

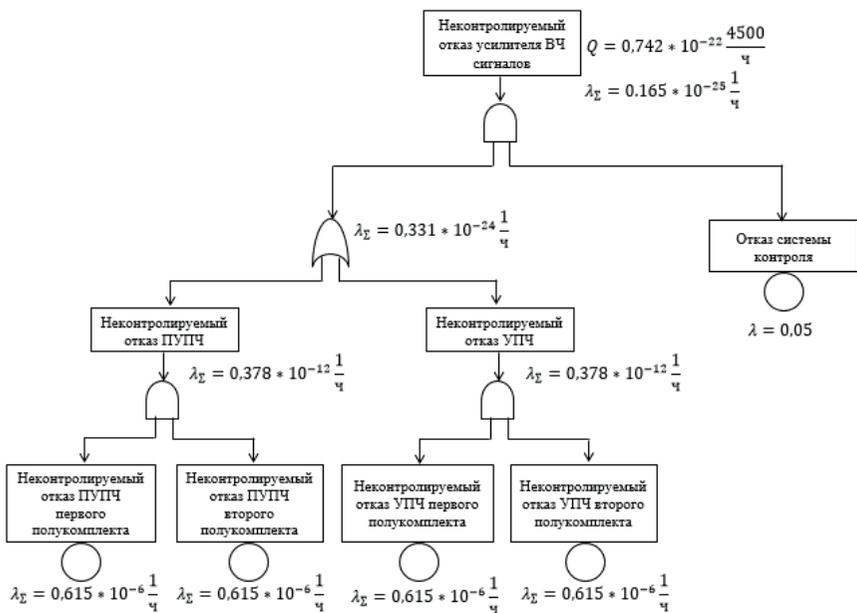


Рисунок Г.6 – Неконтролируемый отказ преобразователя ВЧ сигналов