

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



Ву Чонг Туан

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВЫБОРА
ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУР ПАССИВНОГО
РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ПОДСИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
С УЧЕТОМ ДОПУСКОВ**

Специальность 05.13.01

«Системный анализ, управление и обработка информации
(авиационная и ракетно-космическая техника)»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Гришин Вячеслав Михайлович

Москва – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ПАССИВНО РЕЗЕРВИРОВАННЫХ ПОДСИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ДОПУСКОВ.....	19
1.1 Пассивное резервирование как способ повышения надежности и его свойства.....	19
1.2 Виды, определение и характеристика допусков.....	23
1.3 Кратное и некрatное пассивное резервирование и их взаимосвязь с допуском.....	28
1.4 Анализ влияния величин допусков и кратностей резервирования на значения критических вероятностей элементов пассивно резервированы подсистем ЛА.....	34
1.5 Выводы по главе 1.....	43
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ АНАЛИЗА ПАССИВНО РЕЗЕРВИРОВАННЫХ ПОДСИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ДОПУСКОВ И ИССЛЕДОВАНИЯ НА НЕЙ.....	45
2.1 Формирование модели исследования.....	45
2.2 Постановка задачи анализа.....	47
2.3 Методика решения задачи анализа.....	48
2.4 Исследование зависимости показателя безотказности от кратностей резервирования для различных вероятностей элементов и реализуемых допусков.....	51
2.5 Выводы по главе 2.....	68

ГЛАВА 3 СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ ПАССИВНО РЕЗЕРВИРОВАННЫХ ПОДСИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ДОПУСКОВ ..	71
3.1 Обсуждение проблемы синтеза структуры пассивного резервирования подсистем ЛА	71
3.2 Постановка задачи синтеза структуры пассивного резервирования подсистем ЛА	76
3.3 Методика решения задачи синтеза структуры пассивно резервированных подсистем с учетом допусков	80
3.4 Решение задачи синтеза по комплексному линейному критерию	82
3.5 Решение задачи синтеза по комплексному относительному критерию ..	101
3.6 Сравнение результатов решения задач синтеза структур пассивного резервирования по линейному и относительному комплексным критериям	116
3.7 Выводы по главе 3	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	129
ПРИЛОЖЕНИЯ	144
Приложения А	145
Приложения Б	160
Приложения В	165
Приложения Г	168

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Настоящий период развития техники характеризуется созданием и внедрением сложных технических систем и комплексов. Разрабатываются и успешно применяются полностью автоматизированные технологические процессы производства новых видов техники. Однако необходимо отметить что на данном этапе развития обостряется противоречие между увеличением мощности техники и возросшей вероятности отказа отдельных ее компонентов. Это приводит не только к огромным затратам на ее ремонт, но и к большим экономическим потерям и социальным последствиям, связанным с разрушением крупных объектов и человеческими жертвами.

Например, современные атомные электростанции, авиационные комплексы, спутниковые системы состоят из сотен тысяч комплектующих и компонентов, отказы в которых наносят большой ущерб. Разработка методов и средств повышения качества изделий и связанных с этим способов предупреждения и предотвращения аварий, является важнейшей задачей современного этапа развития.

В связи с научно-техническим прогрессом растут требования к обеспечению безопасности сложных систем и комплексов. Это приводит к необходимости разработки научных основ надежности технических систем, а при проектировании, испытаниях и эксплуатации таких комплексов особое значение имеют вопросы прогнозирования и обеспечения надежности.

Надежность является одной из самых важных понятий современной техники, поскольку от нее в значительной мере зависят такие характеристики, как качество, эффективность, безопасность. Надежность определяется не только как одно из основных свойств системы, характеризующих её способность выполнять

заданные функции, но «Надежностным поведением» определяется техническая эффективность и безопасность функционирования систем.

Принятая в Российской Федерации терминология в этой области определяет ГОСТ 27.002-2015 "Надежность в технике. Термины и определения" [34]. Из него следует, что “надежность - свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования”.

В технической литературе надежность техники часто определяется как совокупность свойств, обеспечивающих выполнение объектом поставленных задач в установленном объеме и сохранение значений необходимых параметров в требуемых пределах в течение заданного периода времени при определенных условиях эксплуатации. Являясь сложным понятием, надежность технических объектов может характеризоваться свойствами, определяющими их работоспособность. К ним относятся: эффективность, живучесть, безопасность. Они определяют разные стороны оценки работоспособности объекта.

Следует выделить два важных обстоятельства к обеспечению надежности технических систем, заложенных в определение их надежности.

Во-первых, основной причиной, препятствующей выполнению объектом предназначенных функций является отказ. Существуют разные виды отказов, такие как полный/неполный, явный/неявный, приработочный/ износный, зависимый/независимый и т.д. Среди возможных видов отказов, внезапный и параметрический – два важнейших их вида, для которых наиболее полно разработана теория надежности.

Во-вторых, надежность объектов определяется во времени. Отсюда следует, что она должна быть связана с основными этапами их жизненного цикла. Действительно, уровень надежности (запасы надежности) закладываются

конструкторами при проектировании объектов, обеспечиваются в процессе их производства и реализуются при эксплуатации [40].

Одним из основных средств в решении проблем обеспечения надежности технических систем на этапах их проектирования, изготовления и эксплуатации являются математические методы [18, 22, 33, 53, 107]. С математическими методами по обеспечению надежности систем повседневно соприкасаются разработчики, эксплуатационники, специалисты по контролю. Им приходится перебирать большое количество конструктивных вариантов и возможных режимов работы проектируемых и эксплуатируемых объектов [63, 85].

Необходимо отметить, на этапе проектирования, математические методы обеспечения надежности занимают важнейшую роль в связи с необходимостью выбора альтернативных вариантов и конструктивных решений. Согласно мнению ряда авторов [58, 74, 89], конечной целью расчета надежности технических систем на этапе их проектирования является нахождение оптимальных, конструктивных решений и параметров.

Можно выделить два подхода к обеспечению надежности технической системы на этапе проектирования. Это:

- повышение надежности элементов;
- введение в систему избыточности.

Первый подход предполагает использование высоконадежных элементов, изготовленных в соответствии с современными технологиями, проверенных и отобранных на заданных режимах работы. Однако данный способ не только требует больших финансовых затрат, но и не обеспечивает на современном этапе развития требуемых показателей надежности.

Второй подход связан с введением в систему избыточности и имеет различные направления. Все многообразие возможных видов избыточности можно представить в следующем виде [47]:

- параметрическая;
- режимная;
- временная;
- структурная (резервирование);
- функциональная;
- информационная.

Параметрическая избыточность - метод повышения надежности системы путем введения запасов на изменение их параметров, не приводящих к отказу системы.

Режимная избыточность - метод повышения надежности систем путем введения в систему запасов по допустимой нагрузке, значительно превышающей номинальную.

Временная избыточность - метод повышения надежности в цифровых системах управления, предусматривающий применение избыточного времени периода квантования, часть которого используется для контроля состояния компонентов системы.

Информационная избыточность - метод повышения надежности систем, который предусматривает использование избыточной информации сверх минимально необходимой для выполнения поставленных задач.

Функциональная избыточность - метод повышения надежности систем, который предусматривает использование, заложенных при проектировании, способностей элементов выполнять не только свои функции, но и частично (или полностью) функции смежных элементов.

Структурная избыточность - метод повышения надежности систем, который предусматривают введение в систему «избыточных» (резервных) элементов, входящих в структуру объекта.

Каждый из указанных видов введения в систему избыточности имеет свою область применения. Однако, в настоящее время наиболее важным и часто используемым способом повышения надежности систем является введение в них структурной избыточности [69, 73, 112].

В зависимости от назначения и особенностей использования технических систем для оценки их надежности применяют четыре вида частных показателей:

- частные показатели безотказности;
- частные показатели ремонтпригодности (восстанавливаемости);
- частные показатели долговечности;
- частные показатели сохранности.

Для ракетно-космических систем наиболее важными являются частные показатели безотказности, так как в подавляющем большинстве случаев они функционируют до первого отказа. В нашей диссертационной работе, как и в других работах, рассматриваются вопросы повышения безотказности подсистем летательных аппаратов за счет введения структурной избыточности, то есть за счет резервирования компонентов систем (подсистем и элементов) [88, 93].

В настоящее время резервирование систем можно классифицировать по следующим признакам:

По характеру резервирования различают активное и пассивное (постоянное) резервирование, каждое из которых имеет свои достоинства и недостатки. Причем, в системах с пассивным резервированием большое значение приобретает анализ работы элементов резервной группы, оставшихся исправными после отказа одного или нескольких элементов. Различают два вида систем с пассивным резервированием:

- системы с неизменным выходным параметром, т.е. системы, у которых при отказе элементов резервной группы выходной параметр не меняется;

- системы с изменяющимся выходным параметром, т.е. системы у которых при отказе хотя бы одного элемента резервной группы выходной параметр меняется.

По способу подключения резервных элементов и активное и пассивное резервирование может быть общим, когда резервируется вся система (или подсистема), блочным, когда резервирование осуществляется по группам элементов и отдельным, когда резервируется каждый элемент системы (подсистемы).

Как известно, активное резервирование, также как пассивное (постоянное) резервирование, при сопоставлении показателей безотказности резервированной и нерезервированной систем имеют критические значения безотказности элементов и соответствующие им области, в которых безотказность резервированной системы хуже, чем нерезервированной [38]. Однако причины наличия указанных областей, а также их свойства в случаях активного и пассивного резервирований существенно различаются.

Как активное, так и пассивное резервирование может быть кратным и некратным. Под кратностью в работе понимается отношение общего числа элементов к числу основных элементов [47]. В некоторых источниках под кратностью понимается отношение числа резервных элементов к числу основных [74]. При кратном резервировании кратность всегда целочисленная величина. При некратном резервировании кратность резервирования может быть как целочисленной величиной, так и дробной.

Таким образом, подсистемы ЛА с некратным пассивным резервированием представляют собой класс подсистем, одним из свойств которого является дробная кратность резервирования, записываемая в виде дроби даже в случае, когда отношение общего числа элементов к числу основных является целочисленной величиной. Другими словами дробная кратность является лишь одним из признаков некратного резервирования, не определяющим его суть.

Главным признаком некратного резервирования, являющимся необходимым условием его реализации является то, что при некратном резервировании любой резервный элемент может заменить любой основной элемент. Необходимые и достаточные условия реализации некратного резервирования рассматриваются в первой главе диссертации.

Класс подсистем с некратным пассивным резервированием входит в более широкий класс – класс пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков на изменение их выходного параметра. Подсистемы этого класса, как будет видно в дальнейшем, могут иметь как кратное, так и некратное резервирование. Причем, расчет надежности технических систем при кратном и некратном резервировании имеет принципиально различный методический аппарат, хотя в обоих случаях он опирается на теорию вероятностей, математическую статистику и математическую логику. Именно безотказность подсистем этого класса является предметом диссертационного исследования.

Актуальность работы определяется востребованностью разработки методического аппарата для решения задачи оптимизации структуры (синтеза структуры) при пассивном резервировании подсистем ЛА с учетом допусков в интересах повышения их безотказности, недостаточностью проработки данного вопроса в литературе и необходимостью совершенствования методологии оптимизации безотказности таких пассивно резервированных систем.

Степень ее разработанности определяется недостаточным вниманием авторов работ по надежности к исследуемым в диссертации вопросам. Это, по-видимому, обусловлено большим разнообразием направлений в теории надежности. В России развитию теории надежности уделялось и уделяется большое внимание. Математическая теория надежности начала разрабатываться в прошлом столетии. В настоящее время, существует огромные количества работ, посвященных проблемам надежности систем и их подсистем. Значительный вклад в последнее десятилетие в теорию надежности внесли российские ученые: Бессонов А.А., Мороз А.В. [9], Богачев А.П., Попов И.Л. [10], Бондаренко В.В.

[13], Буренин В.В., Кириллова Н.П. [14], Ветлугин К.А., Струков А.В. [20], Горелик А. В. [35], Ицкович А.А., Файнбург И.А. [50], Кокушин Н.Н., Тихонов А.А., Петров С.Г. [56], Луговцова Н.Ю. [61], Малафеев С.И., Копейкин А.И. [62], Слышалов В.К. [87] и другие. Большое внимание привлекли к себе новые фундаментальные труды известных ученых: Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. [33], Милёхин Ю.М., Берсон А.Ю., Кавицкая В.К., Еренбург Э.И. [63], Половко А.М., Гуров С.И. [74].

Среди публикаций, посвященных пассивному резервированию следует отметить: работу Анатолия Бойко, Александра Бондаренко, Виктора Савченко, в которой авторы исследуют динамику изменений показателей надёжности пассивно резервированной системы при исправном и дублирующем элементах; работу Анатолия Бойко, в которой автор решает задачу математической формализации описания состояний и переходов пассивно резервируемых технических систем; работу Виктора Савченко, в которой он исследует показатели надёжности пассивно-резервированных технических систем. Изучению вопросов, касающихся проблем различных видов резервирования посвящены работы других авторов: Егоров И.В. [46], Кривопапов Д.М., Юркевич Е.В [59], Зайко Ю.Г., Искандарова Л.Н., Трахтомиров А.В. [49], Гришин В.М., Пью Маунг Ко [37, 38, 77, 78]. Более полный перечень можно найти в списке литературных источников, приведенном в диссертации.

Необходимо отметить, что рассмотренные опубликованные работы, затрагивают отдельные вопросы теории и практического решения задач оптимального резервирования. Однако, обзор и анализ литературы показал, что безотказность пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков не является широко обсуждаемой темой в теории надёжности. Можно указать небольшое число работ, в которых в той или иной мере затрагиваются вопросы пассивного резервирования подсистем с учетом допусков и, связанных с ними, подсистем с дробной кратностью резервирования [9, 22, 45, 47, 63, 74, 89] . Однако потребности практики требуют глубокого и всестороннего исследования

данного вопроса. Более того, анализ публикаций по соответствующей тематике показал отсутствие работ, направленных на решение задач оптимизации при пассивном резервировании с учетом допусков.

Резюмируя изложенное, показана востребованность данного диссертационного исследования, которое направлено на восполнение имеющегося пробела.

Цели и задачи. Целью является разработка методик и моделей для выбора оптимальных параметров структур пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **задачи**:

1. Разработать подходы оптимизации безотказности подсистем ЛА при пассивном резервировании с учетом допусков;
2. Разработать теоретические и методические положения, определяющие способ повышения безотказности пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков;
3. Разработать модели оценки безотказности при решении задач анализа и синтеза пассивно резервированных подсистем с учетом допусков;
4. Разработать алгоритмы оптимизации безотказности пассивно резервированных подсистем с учетом допусков и выявить ограничения на получаемые с их помощью результаты.

Научная новизна диссертационной работы состоит:

- в выявлении особенностей исследования и разработки пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков, определивших в значительной мере свойства моделей анализа и синтеза подсистем данного класса;
- в разработанной модели и методике решения задачи анализа пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков;

- в результатах решения задач анализа, показавшие возможность удовлетворения требований по безотказности не минимальными по размеру структурами резервирования (как считалось раньше), а оптимальными, причем, минимальные структуры резервирования редко удовлетворяют условиям оптимальности;

- в разработанной модели и методике решения двух критериальной задачи синтеза пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков, на основе сведения разными способами частных показателей к двум комплексным критериям;

- в результатах синтеза оптимальных структур пассивного резервирования подсистем ЛА в широком диапазоне допусков и требований по безотказности, выявивших ряд новых закономерностей, вынесенных на защиту.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в возможности использования разработанных моделей, методик и программа при проектировании реальных связанных пар подсистем, допускающих структурную и параметрическую избыточность как в аэрокосмической отрасли, так и в различных отраслях хозяйственного назначения;

- в возможности повышения безотказности пассивно резервированных подсистем за счет увеличения кратности некрatного резервирования без существенного увеличения масс-габаритных характеристик;

- в возможности использования разработанных моделей, методик и программ в учебном процессе в дисциплине “Надежность АКС”.

Методология и методы исследования достижение поставленной цели реализовано путем использования в работе методов математического моделирования, базирующихся на теории вероятностей и математической статистики, теории графов и теории надежности. Используемые в работе модели,

методики и алгоритмы, реализованы в виде компьютерных программ в системе программирования MATLAB.

Положения, выносимые на защиту.

1. Выявленные особенности исследования и разработки пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков такие как: разный характер задания назначенных и реализуемых допусков; обеспечение требований по безотказности как методами кратного, так и некратного резервирования; возможность обеспечения каждого реализуемого допуска множеством различных индивидуальных кратностей резервирования; наличие критических вероятностей, которые могут изменяться (в зависимости от допуска и кратности) в обе стороны, увеличивая или уменьшая диапазон, где выгоден данный способ резервирования; возможность как увеличения, так и уменьшения безотказности подсистем ЛА с увеличением кратности резервирования в зависимости от допуска и др.

2. Способ повышения безотказности пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков за счет применения методов кратного и некратного резервирования, ужесточения реализуемых и назначаемых допусков, увеличения индивидуальной кратности резервирования и безотказности элементов.

3. Постановку и методику решения задачи анализа пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков на основе построения их структурных схем надежности.

4. Результаты решения задачи анализа, показавшие: что использование способа некратного резервирования, а также повышение кратности некратного резервирования является основным средством повышения безотказности подсистем рассматриваемого класса; что минимальную кратность резервирования выгодно применять только в узком диапазоне больших допусков (больше 50%) и низких вероятностей элементов (менее 0,6); что зависимость безотказности указанных резервированных подсистем от безотказности элементов имеет

экстремальный характер при любых допусках и кратностях резервирования, что позволяет поставить задачу синтеза структуры резервирования.

5. Постановку задачи анализа пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков по двум частным показателям путем сведения (свертки) их разными способами к комплексным критериям.

6. Методику синтеза структуры пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков, основанную на решении поставленной задачи в два этапа, когда на первом этапе решается “ослабленная” задача, не учитывающая требований по безотказности, а на втором – исходная задача.

7. Результаты решения задачи синтеза структур пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков, показавшие существование оптимальных решений в широком диапазоне исходных данных (индивидуальных кратностей, реализуемых допусков, безотказностей элементов и требуемых значений безотказности резервированных подсистем).

8. Рекомендации по использованию двух комплексных критериев для синтеза структур резервирования, в частности: при необходимости решения задачи синтеза из сравнительно малонадежных элементов целесообразно использовать комплексный относительный критерий, а при желании обеспечить более высокие оптимальные значения безотказности резервированных подсистем – комплексный линейный критерий; при одинаковых реализуемых допусках более 20% структуры резервирования синтезированные по комплексному линейному критерию менее сложны, чем по комплексному относительному критерию (причем разница в размерах структур быстро растет с увеличением допусков), а при допусках не более 20% результаты синтеза по обоим комплексным критериям практически совпадают.

Степень достоверности и апробация результатов диссертационного исследования обеспечивается:

- 1) Корректным использованием аппарата теории вероятностей, а также математических моделей надежности и методов оптимизации;
- 2) Соответствием точности применяемых в работе приближенных математических моделей, точности исходных данных и получаемых результатов;
- 3) Правильной работой алгоритмов и программ, отсутствием в них логических и синтаксических ошибок;
- 4) Сопоставлением результатов расчетами, полученных разными способами, в частности по двум комплексным критериям;
- 5) Значительным объемом выполненных в работе вычислений, результаты которых являются не противоречивыми и укладываются в рамки существующих представлений теории вероятностей и теории надежности.

Апробация работы результаты диссертационной работы докладывались на 23-й международной конференции «Системный анализ и управление» (Крым, Евпатория, 2018), на 27-й международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» (Республика Крым, Алушта, 2018), на 17-й международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, МАИ, 2018), на 24-й международной конференции «Системный анализ и управление» (Крым, Евпатория, 2019), на 18-й международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, МАИ, 2019).

Публикации: основные материалы диссертационной работы опубликованы в 6 печатных работах. В том числе в четырех работах опубликована в журнале, рекомендуемых ВАК, и в двух работах опубликована в журналах Scopus.

Объем и структура работы: диссертационная работа состоит из введения, 3-х глав, заключения по работе, списка литературы и приложения. Работа содержит 172 страниц, 34 таблицы, 91 рисунок.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, приводится обзор существующих результатов исследования по теме диссертации, формулируется цель работы, задачи и методы исследования, обосновано научная новизна и отмечена практическая значимость работы.

Первая глава посвящена выявлению особенностей пассивно резервированных подсистем с учетом допусков. Главная – наличие масштабной сетки разнообразных минимальных кратностей резервированных подсистем, соответствующих множеству различных значений назначенных допусков 2-й подсистемы. Причем каждая минимальная кратность этой сетки определяет начальное значение “линейки” возрастающих кратностей (и соответствующих структур резервирования) при одном и том же допуске.

Вторая глава посвящена постановке и решению задачи анализа влияния кратности резервирования, допуска и безотказности элементов на безотказность резервированной подсистемы. Эта глава позволила установить, что рекомендуется в литературе минимальная кратность резервирования является оптимальным решением только в практически не используемых диапазонах низких безотказностей элементов и внешних допусков (более 40-50%). В подавляющем большинстве значений безотказности элементов и назначаемых (нормативно – технической документацией) допусков повышенные кратности позволяет повышать безотказность резервированных подсистем. Это позволяет ставить и решать задачу синтеза структуры при ограничениях на допуск и требуемую безотказность.

Третья глава посвящена синтезу структуры резервирования по двум численным показателям: безотказности элементов, которую хотелось бы иметь как можно ниже и безотказности пассивно резервированной подсистемы, состоящей из элементов – как можно выше. Проведенные в работе исследования показали, что линейная свертка частных показателей $\Delta P_c = P_c + (-p)$ имеет экстремум и по безотказности элементов p . Это позволило найти оптимальные компромиссные значения частных показателей математически без каких – либо

всеобщих коэффициентах a_i при частных показателей. В работе также использовали относительные комплексные критерии (в виде отклонения частных показателей) который также имеет экстремум, но отличный от линейной сверки. В диссертации приведены результаты на синтезу структуры по линейному и относительному комплексному критерию, даны рекомендации по их применению.

В **заключении** проводятся основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы.

ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ПАССИВНО РЕЗЕРВИРОВАННЫХ ПОДСИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ДОПУСКОВ

Данная глава направлена на выявление специфических особенностей, которые необходимо учитывать при исследовании и разработке пассивно резервированных подсистем с учетом допусков при внезапных независимых отказах. Показано, что в данном виде резервирования необходимо учитывать наличие в одних и тех же подсистемах назначаемых и реализуемых допусков, кратного и некратного резервирования, шкал допусков с различными уровнями значимости, диапазонов вероятностей элементов, где выгодно и невыгодно резервирование и т.п.

1.1 Пассивное резервирование как способ повышения надежности и его свойства

Наиболее простым приемом повышения надежности системы в целом является повышения надежности элементов. Работоспособность систем без резервирования требует высокой надежности всех элементов системы. В сложных технических устройствах без резервирования практически никогда не удастся достичь высокой надежности, даже если использовать составляющие элементы с высокими показателями надежности (выше 0,99).

Согласно Киндееву Е.А. [54], термин резервирование означает применение дополнительных средств и (или) возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких элементов. При резервировании в состав технических систем вводятся избыточные элементы. Резервирование реализует принцип одного из видов избыточности, а именно – структурной избыточности.

Степень структурной избыточности часто оценивают параметром, называемым кратностью резервирования K . Кратность резервирования является основным параметром резервирования, который определяется по разному: либо как отношение числа резервных элементов r к числу основных m [74]; либо как отношение общего числа элементов n к числу основных m [47]. Второе определение наиболее естественно отражает понятие кратности числа основных элементов общему количеству элементов. Поэтому в качестве кратности резервирования в работе будем использовать формулу:

$$K = \frac{n}{m}. \quad (1.1)$$

Пассивное или, как его часто называют, постоянное резервирование подсистем заключается в том, что вместо одной подсистемы для повышения надежности включаются в работу параллельно основной, две или несколько резервных подсистем. Таким образом, при пассивном резервировании образуется новое устройство – резервированная подсистема, в которой в качестве элементов выступают несколько исходных компонентов или подсистем. Специфика работы таких резервированных устройств заключается в том, что основные элементы в них неотличимы от резервных и работают вместе с ними в одинаковых условиях. Можно указать только численности этих элементов.

Важным свойством пассивного резервирования является расход ресурса резервных элементов наравне с основными. Поэтому пассивное резервирование часто называют горячим. Другой особенностью пассивного резервирования подсистем является то, что при отказах элементов не возникает перерывов в их работе. Поэтому такое резервирование применяют в подсистемах, не допускающих даже кратковременных перерывов в работе.

Одной из особенностей технических систем является взаимосвязанность их подсистем на любом уровне иерархического членения, так что выходные характеристики одной подсистемы являются входными для другой. Поэтому для обеспечения работоспособности систем в целом необходимо, чтобы в процессе

функционирования взаимосвязанных подсистем их выходные/входные характеристики либо вообще не менялись при отказах элементов, либо менялись в допустимых пределах.

По последствиям отказов элементов подсистем с пассивным резервированием, при сохранении работоспособности смежных подсистем различают:

- подсистемы и устройства, не меняющие свои выходные характеристики;
- подсистемы и устройства, меняющие свои характеристики.

К первому типу относятся, как правило, механические и электромеханические устройства. Например, передача крутящего момента от двигателя к другому устройству (генератору, насосу, помпе и т.п.) может осуществляться клиноременной передачей. Для нормального функционирования достаточно одного-двух ремней. Для повышения надежности ставят три-четыре ремня. Обрыв одного ремня не приводит к изменению крутящего момента. Другим примером могут служить токоподводящие или токосъемные две-три щетки, когда для нормального функционирования достаточно исправности одной щетки.

Ко второму типу относятся электромеханические, электрические и электронные устройства. Например, питание борта ЛА может осуществляться двумя параллельно работающими синхронными генераторами. Отказ одного генератора не приводит к отказу системы электропитания. Однако мощности, вырабатываемой одним генератором может быть недостаточно для нормальной работы ряда устройств, что может привести к отказу. Аналогичная ситуация имеет место при пассивном резервировании операционных усилителей, корректирующих устройств, усилителей мощности, приводов, являющихся компонентами контуров систем управления ЛА.

В связи с этим различают пассивное резервирование с учетом допустимых изменений выходных параметров (с учетом допусков) и пассивное

резервирование без учета допусков. Оба этих вида резервирования могут быть кратным и некратным. В работе рассматриваются пассивно резервированные подсистемы с учетом допусков.

При параллельном включении таких подсистем, их выходные характеристики складываются либо подсчитываются (как в мажоритарных системах). Например, у резервированных операционных усилителей складывается выходной ток, у усилителей мощности, а также в системах электроснабжения борта ЛА переменным током – выходная мощность, у резервированных приводов – усилие на выходном валу или крутящий момент, у мажоритарных систем подсчитывается количество прошедших сигналов через кворумный элемент.

При пассивном резервировании подсистем без учета допусков резервированная подсистема считается исправной, если в ней имеется хотя бы один исправный элемент [74], т.е. количества основных элементов $m=1$. Однако указанное утверждение справедливо при отсутствии влияния выходных характеристик резервированных подсистем на работоспособность связанных с ними подсистем. При наличии указанного влияния необходимо учитывать допуск на отклонение выходных параметров пассивно резервированных подсистем при отказах их элементов для обеспечения работоспособности связанных с ними подсистем. Учет допусков на изменение выходных параметров пассивно резервированной подсистемы может существенно повлиять на структуру ее резервирования и, в частности, на количество ее основных элементов, которое может быть существенно больше единицы.

Под количеством основных элементов пассивно резервированной подсистемы будем понимать то минимальное количество исправных элементов m , из общего числа n , при котором обеспечивается отклонение ее выходного параметра, не превышающее предельно допустимого при отказах всех резервных элементов, ($r = n - m$) и при этом сохраняется работоспособность и резервированной, и смежной подсистем.

Например, в системах питания топливом двигателей летательных аппаратов назначается допустимое предельное уменьшение от номинала суммарной производительности топливных насосов, исходя из особенностей конструкции и требования обеспечения всех режимов работы двигателя, включая форсированные, в течение необходимого времени [6]. Аналогичная ситуация имеет место в системах питания борта ЛА постоянным и переменным током [40], рулевых приводах, усилителях мощности контуров управления ЛА [79] и т.д., когда уменьшение выходной мощности, крутящего момента (либо усилия) сверх допустимых пределов может привести к отказу техники.

1.2 Виды, определение и характеристика допусков

Следует различать допуски назначенные и допуски реализуемые. Назначенный допуск задается на смежную подсистему, связанную конструктивно с пассивно резервированной подсистемой. Он определяет предельно допустимое отклонение от номинального значения (номинала) входного параметра смежной подсистемы, обеспечивающее ее нормальное функционирование. Назначенный допуск определяется нормативно-технической документацией на рассматриваемый объект техники. Он задается на непрерывной шкале возможных допусков. Например, в усилителях мощности систем управления ЛА он определяет минимальную суммарную выходную мощность, обеспечивающую работоспособность рулевого привода во всех режимах в течение необходимого времени. Аналогичная ситуация имеет место и в других, указанных в предыдущем подразделе подсистемах.

Реализуемый допуск обеспечивается пассивно резервированной подсистемой. Он носит дискретный характер, определяемый дискретной структурой пассивного резервирования, т.е. определяется дискретными величинами m , r и n . Реализуемый допуск характеризуется величиной отклонения выходного параметра от номинала при отказе (выходе из строя) всех ее $r = n - m$ резервных элементов. Как следует из вышесказанного, назначенный и

реализуемый допуски могут не совпадать по своим значениям. В этом случае реализуемый при пассивном резервировании допуск должен быть "уже" назначенного.

В системах общего пользования назначенный допуск может задаваться в сторону увеличения от номинала. Их определение и свойства отличаются от допусков в сторону уменьшения от номинала, рассматриваемых в работе.

Реализуемый и назначенный допуски могут задаваться в абсолютных и относительных величинах. Назначенный допуск в абсолютных величинах определяет предельно допустимое уменьшение входного параметра смежной подсистемы, связанной с пассивно резервированной подсистемой.

$$\Delta W_n = W_{nom} - W_m. \quad (1.2)$$

Где: W_{nom} - номинальное значение входного параметра смежной подсистемы;
 - W_m минимальное значение входного параметра смежной подсистемы, обеспечивающее ее работоспособность на всех режимах.

Очевидно, назначенный допуск в абсолютных величинах может меняться от 0 до W_{nom} .

Назначенный допуск в относительных величинах определяется выражением:

$$dW_n = \frac{W_{nom} - W_m}{W_{nom}} \cdot 100\%. \quad (1.3)$$

Он показывает допустимую относительную величину уменьшения входного параметра смежной подсистемы от номинала, приходящуюся на единицу ее номинального значения, выраженную в процентах. Назначенный допуск в относительных величинах может меняться от 0 до 100%.

Реализуемый допуск в абсолютных значениях ΔW_p определяется, как отмечалось ранее, величиной отклонения от номинала выходного параметра при выходе из строя (отказе) всех ее резервных элементов.

$$\Delta W_p = W \cdot n - W \cdot m = r \cdot W, \quad (1.4)$$

где, W - значение выходного параметра одного из n параллельно работающих элементов пассивно резервированной подсистемы.

Реализуемый допуск в относительных значениях определяется величиной отношения ΔW_p к номинальному значению выходного параметра резервированной подсистемы $W \cdot n$, выраженного в процентах

$$dW_p = \frac{r \cdot W}{n \cdot W} \cdot 100\% = \frac{r}{n} \cdot 100\% = \frac{n-m}{n} \cdot 100\%. \quad (1.5)$$

Для реализуемых и назначенных допусков как в абсолютном, так и в относительном представлении должны выполняться условия:

$$\Delta W_n \geq \Delta W_p, \quad (1.6)$$

$$dW_n \geq dW_p. \quad (1.7)$$

Реализуемые допуски в абсолютном и относительном представлении могут изменяться в тех же пределах, что и назначенные допуски. Более употребительными являются назначенные и реализуемые допуски в относительном представлении. Например, реализуемые допуски в относительном представлении зависят только от параметров структуры резервирования m , n , r и не зависят от выходных параметров подсистем.

Для практического использования интерес представляет дискретная сетка реализуемых допусков в относительном представлении. Составим таблицу реализуемых значений относительных допусков для различных структур пассивного резервирования. Наиболее наглядный вид таблица имеет в зависимости от параметров m и r .

Таблица 1.1 Значения реализуемых относительных допусков в процентах в зависимости от количества основных m и резервных r элементов

m	r										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	50,0	66,7	75,0	80,0	83,3	85,7	87,5	88,0	90,0	90,9	91,7
2	33,3	50,0	60,0	66,7	71,4	75,0	77,8	80,0	81,8	83,3	84,6
3	25,0	40,0	50,0	57,1	62,5	66,7	70,0	72,7	75,0	76,9	78,6
4	20,0	33,3	42,8	50,0	55,5	60,0	63,6	66,7	69,2	71,4	73,3
5	16,7	28,6	37,5	44,4	50,0	54,5	58,3	61,5	64,3	66,7	68,7
6	14,3	25,0	33,3	40,0	45,4	50,0	53,8	57,1	60,0	62,5	64,7
7	12,5	22,2	30,0	36,4	41,7	46,1	50,0	53,5	56,2	58,8	61,1
8	11,1	20,0	27,3	33,3	38,5	42,8	46,7	50,0	52,9	55,5	57,9
9	10,0	18,2	25,0	30,8	35,7	40,0	43,7	47,1	50,0	52,6	55,0

Анализ представленной таблицы позволяет сделать следующие выводы:

1) Реализуемые допуски образуют достаточно большое многообразие возможных дискретных значений как более 50%, так и менее 50%;

2) Значения допусков тесно связаны со сложностью структур резервирования – с ростом величин m и r сложность структур резервирования возрастает;

3) Изменение допусков с возрастанием величин m и r имеет противоположный характер, так с ростом r при неизменном m допуски возрастают, а с ростом m при неизменном r допуски убывают;

4) При одновременном увеличении r и m допуски слабо меняются и повторяются с определенной периодичностью. Так допуск 50% реализуется при r

= 1 и $m = 1$, $r = 2$ и $m = 2$ и т.д., допуск 33,3% реализуется при $r = 1$ и $m = 2$, $r = 2$ и $m = 4$ и т.д.;

5) При любом фиксированном значении m (не равном нулю) и при r стремящемся к бесконечности допуски стремятся к 100% (

$$\lim_{r \rightarrow \infty} dW_P = \frac{r}{n} \cdot 100\% = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{r}{r+m} \cdot 100\% = \frac{\infty}{\infty}, \text{ разрешая неопределенность имеем}$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\frac{r}{r+m}}{\frac{r}{r} + \frac{m}{r}} \cdot 100\% = 100\%);$$

б) При любом фиксированном r и при m стремящемся к бесконечности допуски стремятся к нулю ($\lim_{m \rightarrow \infty} dW_P = \frac{r}{n} \cdot 100\% = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{r}{r+m} \cdot 100\% = 0$, т.к. $n = r + m$).

Для практического использования наиболее важной является шкала убывающих, то есть более жестких допусков. Поэтому будем рассматривать изменение допусков по столбцам. Наиболее значимыми являются допуски первого столбца таблицы 1.1 (при $r = 1$), образующие следующий ряд значений: 50%; 33,3%; 25%; 20%; 16,7%; 14,3%; 12,5%; 11,1%; 10%. Назовем их допусками первого уровня. Соответственно допуски, задаваемые вторым, третьим и последующими столбцами будем называть допусками второго, третьего и последующих уровней. С ростом уровня допуска быстро усложняется структура резервирования, определяемая количеством основных m и резервных r элементов. Поэтому наиболее значимыми являются допуски первого и второго уровней. Совместное использование допусков первого и второго уровней обеспечивает более частую сетку реализуемых допусков. Образующая ими сетка неповторяющихся относительных реализуемых допусков в соответствии с таблицей 1.1 имеет вид: 66,7%; 50%; 40%; 33,3%; 28,6%; 25%; 22,2%; 20%; 18,2%; 16,7%; 14,3%; 12,5%; 11,1%; 10%. Такая сетка обеспечивает хорошее приближение к назначенным допускам.

Однако надо иметь ввиду, что допуски различных уровней, как будет показано в подразделе 1.3 и 3.4 плохо совмещаются друг с другом по показателям

безотказности. Это обусловлено тем, что показатели безотказности наиболее сильно зависят от количества резервных элементов r в структуре резервирования, а это количество, как видно из таблицы 1, меняется при увеличении уровня допуска. Поэтому в дальнейшем будем проводить расчеты показателей безотказности отдельно для допусков первого и второго уровней.

1.3 Кратное и некрatное пассивное резервирование и их взаимосвязь с допуском

Представленные в таблице 1.1 допуски соответствуют структурам резервирования с минимальными кратностями. Например, допуск 50% при $r = 1$ и $m = 1$ соответствует кратности $K = \frac{2}{1} = 2$, допуск 33,3% при $r = 1$ и $m = 2$ соответствует кратности $K = \frac{3}{2}$ и т. д. Меньших значений кратностей при указанных допусках не существует.

Первая строка таблицы 1.1 соответствует подсистемам с кратным резервированием, так как выполняются условия реализации кратного резервирования и не выполняются условия реализации некрatного резервирования. Необходимыми и достаточными условиями реализации кратного резервирования являются:

1. Количество основных элементов должно быть больше нуля ($m > 0$);
2. Общее количество элементов должно быть больше числа основных ($n > m$);
3. Любой элемент структуры резервирования может заменить строго определенный отказавший элемент.

Например, при $r = 1$ кратность равна 2, при $r = 2$ кратность равна 3, а при $r = 11$ кратность равна 12. Таким образом, первая строка таблицы 1.1 реализует изменение кратности от дублирования до двенадцати кратного резервирования. Допуски ниже первой строки соответствуют структурам с некрatным резервированием. Так как выполняются условия реализации некрatного

резервирования и не выполняются условия реализации кратного резервирования. Они определяют основной объем реализуемых допусков и представляют наибольший интерес для исследования.

Необходимыми и достаточными условиями реализации некрatного резервирования являются:

1. Количество основных элементов должно быть больше одного ($m > 1$);
2. Общее количество элементов должно быть больше числа основных ($n > m$);
3. Любой элемент структуры резервирования может заменить любой отказавший.

Следует отметить, что при исследовании подсистем с некрatным резервированием кратность нужно записывать в виде несокращаемой дроби даже, если кратность представляет собой целочисленное отношение. Это обусловлено не только тем, что дробная кратность резервирования является признаком некрatного резервирования, но и тем, что числитель и знаменатель этой дроби определяют структуру резервирования (параметры n и m). Кроме того, подсистемы с некрatным резервированием обладают важным свойством – показатели безотказности (надежности) подсистем с некрatным резервированием всегда выше подсистем с кратным резервированием при одних и тех же численностях m и n . Однако, «платой» за это полезное свойство, как будет показано в дальнейшем, является наличие у подсистем с некрatным резервированием критических значений вероятностей элементов резервированных подсистем, существенно сужающих диапазон, где выгоден данный вид резервирования.

Каждый допуск может быть реализован при различных значениях кратностей как кратного, так и некрatного резервирования. Причем, для каждого допуска существует своя шкала (линейка) различных индивидуальных, возрастающих по величинам n и m кратностей, начинающаяся с минимального значения. Поэтому у табл.1.1 как бы появляется третье измерение, так как

каждому допуску можно поставить в соответствие свою линейку возрастающих индивидуальных кратностей $K_i^и$. Как минимальные значения, так и другие индивидуальные кратности различных допусков существенно отличаются друг от друга. Таким образом, существует большое многообразие различных кратностей для различных значений допусков.

Например, при допуске 50% первого уровня возрастающий ряд индивидуальных кратностей имеет вид: $K_1^и = \frac{2}{1} = 2$, $K_2^и = \frac{4}{2}$, $K_3^и = \frac{6}{3}$... При допуске 33,3% возрастающий ряд кратностей имеет вид: $K_1^и = \frac{3}{2}$, $K_2^и = \frac{6}{4}$, $K_3^и = \frac{9}{6}$... При допуске 25% первого уровня возрастающий ряд кратностей имеет вид: $K_1^и = \frac{4}{3}$, $K_2^и = \frac{8}{6}$, $K_3^и = \frac{12}{9}$...

Аналогично, при допуске 66,7% второго уровня возрастающий ряд индивидуальных кратностей имеет вид: $K_2^и = \frac{3}{1} = 3$, $K_3^и = \frac{6}{2}$, $K_4^и = \frac{9}{3}$... При допуске 50% второго уровня: $K_2^и = \frac{4}{2}$, $K_3^и = \frac{8}{4}$, $K_4^и = \frac{12}{6}$... У линеек возрастающих кратностей допусков первого уровня количество резервных элементов образует арифметическую прогрессию с разностью $d = 1$, у линеек допусков второго уровня – арифметическую прогрессию с разностью $d = 2$ и т.д. Например, количество резервных элементов ($r = n - m$) для допуска 50% первого уровня образуют последовательность: $2 - 1 = 1$, $4 - 2 = 2$, $6 - 3 = 3$ и т.д.; для допуска 33,3% первого уровня $3 - 2 = 1$, $6 - 4 = 2$, $9 - 6 = 3$ и т.д.; для допуска 25% первого уровня $4 - 3 = 1$, $8 - 6 = 2$, $12 - 9 = 3$ и т.д. Для допуска 66,7% второго уровня количество резервных элементов образует последовательность: $3 - 1 = 2$, $6 - 2 = 4$, $9 - 3 = 6$ и т.д.; для допуска 50% второго уровня $4 - 2 = 2$, $8 - 4 = 4$, $12 - 6 = 6$ и т.д.

Для сопоставления показателей безотказности при разных допусках в зависимости от ряд возрастающих индивидуальных кратностей целесообразно эти различающиеся возрастающие индивидуальные кратности как - то

унифицировать. В качестве унифицирующего параметра примем величину обобщенной кратности K_i , где i - порядковый номер индивидуальных кратностей в последовательностях их возрастающих отношений при любых значениях реализуемых допусков. В дальнейшем наряду с индивидуальными значениями кратностей будем использовать обобщенные значения K_i , обезличивающие индивидуальные значения $K_i^и$. В таблице 1.2 представлены ряды из десяти возрастающих кратностей, в индивидуальном и обобщенном представлении, составленных для допусков первого уровня таблицы 1.1, а в таблице 1.3 аналогичные ряды кратностей для допусков второго уровня.

В общем виде линейки индивидуальных кратностей рассчитываются по формуле:

$$K_i^и = \frac{n_i}{m_i} = \frac{n_m \cdot i}{m_m \cdot i} \quad (1.8)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$ для допусков 1-го уровня и $i = 2, 3, 4, \dots$ для допусков 2-го второго уровня.

Здесь n_m и m_m – минимальные значения параметров структур, задаваемые таблицей 1, определяющие минимальные кратности в каждом допуске. В дальнейшем, если это специально оговорено, под кратностью будем понимать индивидуальную кратность.

Таблица 1.2 Величины индивидуальных и обобщенных кратностей, соответствующих значениям реализуемых относительных допусков первого уровня, представленных в таблице 1.1

dW %	Обобщенные кратности резервирования K_i									
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}
50	2	$\frac{4}{2}$	$\frac{6}{3}$	$\frac{8}{4}$	$\frac{10}{5}$	$\frac{12}{6}$	$\frac{14}{7}$	$\frac{16}{8}$	$\frac{18}{9}$	$\frac{20}{10}$

33,3	$\frac{3}{2}$	$\frac{6}{4}$	$\frac{9}{6}$	$\frac{12}{8}$	$\frac{15}{10}$	$\frac{18}{12}$	$\frac{21}{14}$	$\frac{24}{16}$	$\frac{27}{18}$	$\frac{30}{20}$
25	$\frac{4}{3}$	$\frac{8}{6}$	$\frac{12}{9}$	$\frac{16}{12}$	$\frac{20}{15}$	$\frac{24}{18}$	$\frac{28}{21}$	$\frac{32}{24}$	$\frac{36}{27}$	$\frac{40}{30}$
20	$\frac{5}{4}$	$\frac{10}{8}$	$\frac{15}{12}$	$\frac{20}{16}$	$\frac{25}{20}$	$\frac{30}{24}$	$\frac{35}{28}$	$\frac{40}{32}$	$\frac{45}{36}$	$\frac{50}{40}$
16,7	$\frac{6}{5}$	$\frac{12}{10}$	$\frac{18}{15}$	$\frac{24}{20}$	$\frac{30}{25}$	$\frac{36}{30}$	$\frac{42}{35}$	$\frac{48}{40}$	$\frac{54}{45}$	$\frac{60}{50}$
14,3	$\frac{7}{6}$	$\frac{14}{12}$	$\frac{21}{18}$	$\frac{28}{24}$	$\frac{35}{30}$	$\frac{42}{36}$	$\frac{49}{42}$	$\frac{56}{48}$	$\frac{63}{54}$	$\frac{70}{60}$
12,5	$\frac{8}{7}$	$\frac{16}{14}$	$\frac{24}{21}$	$\frac{32}{28}$	$\frac{40}{35}$	$\frac{48}{42}$	$\frac{56}{49}$	$\frac{64}{56}$	$\frac{72}{63}$	$\frac{80}{70}$
11,1	$\frac{9}{8}$	$\frac{18}{16}$	$\frac{27}{24}$	$\frac{36}{32}$	$\frac{45}{40}$	$\frac{54}{48}$	$\frac{63}{56}$	$\frac{72}{64}$	$\frac{81}{72}$	$\frac{90}{80}$
10	$\frac{10}{9}$	$\frac{20}{18}$	$\frac{30}{27}$	$\frac{40}{36}$	$\frac{50}{45}$	$\frac{60}{54}$	$\frac{70}{63}$	$\frac{80}{72}$	$\frac{90}{81}$	$\frac{100}{90}$

Таблица 1.3 Величины индивидуальных и обобщенных кратностей, соответствующих значениям реализуемых относительных допусков второго уровня, представленных в таблице 1.1

dW %	Обобщенные кратности резервирования K_i									
	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}	K_{11}
66,7	3	$\frac{6}{2}$	$\frac{9}{3}$	$\frac{12}{4}$	$\frac{15}{5}$	$\frac{18}{6}$	$\frac{21}{7}$	$\frac{24}{8}$	$\frac{27}{9}$	$\frac{30}{10}$
50	$\frac{4}{2}$	$\frac{8}{4}$	$\frac{12}{6}$	$\frac{16}{8}$	$\frac{20}{10}$	$\frac{24}{12}$	$\frac{28}{14}$	$\frac{32}{16}$	$\frac{36}{18}$	$\frac{40}{20}$
40	$\frac{5}{3}$	$\frac{10}{6}$	$\frac{15}{9}$	$\frac{20}{12}$	$\frac{25}{15}$	$\frac{30}{18}$	$\frac{35}{21}$	$\frac{40}{24}$	$\frac{45}{27}$	$\frac{50}{30}$

33,3	$\frac{6}{4}$	$\frac{12}{8}$	$\frac{18}{12}$	$\frac{24}{16}$	$\frac{30}{20}$	$\frac{36}{24}$	$\frac{42}{28}$	$\frac{48}{32}$	$\frac{54}{36}$	$\frac{60}{40}$
28,6	$\frac{7}{5}$	$\frac{14}{10}$	$\frac{21}{15}$	$\frac{28}{20}$	$\frac{35}{25}$	$\frac{42}{30}$	$\frac{49}{35}$	$\frac{56}{40}$	$\frac{63}{45}$	$\frac{70}{50}$
25	$\frac{8}{6}$	$\frac{16}{12}$	$\frac{24}{18}$	$\frac{32}{24}$	$\frac{40}{30}$	$\frac{48}{36}$	$\frac{56}{42}$	$\frac{64}{48}$	$\frac{72}{54}$	$\frac{80}{60}$
22,2	$\frac{9}{7}$	$\frac{18}{14}$	$\frac{27}{21}$	$\frac{36}{28}$	$\frac{45}{35}$	$\frac{54}{42}$	$\frac{63}{49}$	$\frac{72}{56}$	$\frac{81}{63}$	$\frac{90}{70}$
20	$\frac{10}{8}$	$\frac{20}{16}$	$\frac{30}{24}$	$\frac{40}{32}$	$\frac{50}{40}$	$\frac{60}{48}$	$\frac{70}{56}$	$\frac{80}{64}$	$\frac{90}{72}$	$\frac{100}{80}$
18,2	$\frac{11}{9}$	$\frac{22}{18}$	$\frac{33}{27}$	$\frac{44}{36}$	$\frac{55}{45}$	$\frac{66}{54}$	$\frac{77}{63}$	$\frac{88}{72}$	$\frac{99}{81}$	$\frac{110}{90}$

Первая клетка таблицы 1.2 при допуске 50% и таблицы 1.3 при допуске 66,7% соответствуют кратному резервированию, а остальные клетки двух указанных таблиц – некратному резервированию.

Одной из важнейших особенностей структур пассивного резервирования подсистемы ЛА с учетом допусков является уменьшение масс-габаритных (и стоимостных) характеристик их элементов с ужесточением допусков и возрастанием кратностей по сравнению с аналогичными характеристиками нерезервированной подсистемы. Действительно, замена нерезервированной подсистемы из одного элемента с номинальным значением выходного параметра W_{nom} на пассивно резервированную подсистему из n параллельно работающих одинаковых элементов приводит к уменьшению в n раз их выходных параметров W .

$$W = \frac{W_{nom}}{n} \quad (1.9)$$

В связи со сказанным можно предположить, что замена нерезервированной подсистемы на пассивно резервированную из n элементов в интересах повышения

ее безотказности не приведет к существенному увеличению стоимости и массо-габаритных характеристик резервированной подсистемы в целом.

Возникают важные вопросы: "Как меняются характеристики безотказности пассивно резервированной подсистемы в зависимости от кратности и какое значение кратности в наибольшей степени удовлетворяет требованиям по безотказности при заданном назначенном допуске?" Ответ на эти вопросы зависят от выбранного критерия и технических требований к рассматриваемой подсистеме (требований по безотказности к подсистеме в целом и ее элементам, назначенному допуску и др.) и будут рассмотрены во второй и третьей главе.

1.4 Анализ влияния величин допусков и кратностей резервирования на значения критических вероятностей элементов пассивно резервированных подсистем ЛА

Критические значения вероятностей элементов связаны с показателями безотказности нерезервированной и пассивно резервированной подсистем ЛА. В качестве их показателей безотказности будем использовать вероятности безотказной работы, часто называемые, в виду их важности, функциями надежности (функциями безотказности).

Пусть $P_c(t_3) = P_c$ - вероятность безотказной работы пассивно резервированной подсистемы за время выполнения задания, а $p(t_3) = p$ - вероятность безотказной работы нерезервированной подсистемы (элемента пассивно резервированной подсистемы) за время выполнения задания. Очевидно функция безотказности пассивно резервированной подсистемы P_c зависит от структуры резервирования (параметров m и n) и от безотказности ее элементов p :

$$P_c = P_c(p, n, m). \quad (1.10)$$

Среди множества вероятностных, логико-вероятностных и логических методов расчета функции (1.10) выберем один из вероятностных методов.

Принятые в работе условия функционирования элементов пассивно резервированных подсистем удовлетворяют требованиям теоремы Бернулли о

повторении опытов [94]. Поэтому для расчета показателя безотказности будем использовать формулу биномиального закона распределения.

Согласно этой формуле вероятность безотказной работы ровно m элементов из общего числа n элементов пассивно резервированной подсистемы определяется выражением [74]:

$$P_{m, n} = C_n^m \cdot p^m \cdot (1-p)^{(n-m)}. \quad (1.11)$$

Функция безотказности (1.10) определяется как вероятность безотказной работы не менее m элементов из общего числа n :

$$P_c = \sum_{i=m}^n C_n^i \cdot p^i \cdot (1-p)^{(n-i)}. \quad (1.12)$$

Для подсистем со структурами кратного резервирования любой кратности (первая строка таблицы 1.1) функция безотказности P_c всегда больше функции безотказности нерезервированной подсистемы на открытом интервале: $0 < p < 1$. Это следует из утверждения [74], что подсистема ЛА с кратным пассивным резервированием является исправной, если исправен хотя бы один ее элемент. Число основных элементов в этом случае $m = 1$, а функция безотказности подсистем с кратным пассивным резервированием определяется выражениями:

$$P_c = \sum_{i=1}^n C_n^i \cdot p^i \cdot (1-p)^{(n-i)}, \quad (1.13)$$

$$P_c = 1 - q^n \quad \text{где} \quad q = 1 - p. \quad (1.14)$$

Из выражения (1.14) следует, что для подсистем с кратным пассивным резервированием справедливо неравенство:

$$P_c = 1 - q^n > p = 1 - q. \quad (1.15)$$

Выражение (1.15) доказывает правильность высказанного выше утверждения.

Для подсистем со структурами некрatного пассивного резервирования (вторая и нижеследующие строки допусков таблицы 1.1) число основных элементов как указывалось раньше всегда больше единицы: $m > 1$. Поэтому

суммирование в формулах безотказности (1.12) для любых допусков и кратностей осуществляется со значений индекса i , равного двум, трем, четырем и т.д. Например, для трех допусков 1-го уровня при минимальных кратностях ($dW = 33,3\%$; $dW = 25\%$; $dW = 20\%$) формулы безотказности, соответственно, имеют вид:

$$P_c^1 = \sum_{i=2}^3 C_3^i \cdot p^i \cdot (1-p)^{(3-i)}, \quad K_1^n = \frac{3}{2}; \quad (1.16)$$

$$P_c^2 = \sum_{i=3}^4 C_4^i \cdot p^i \cdot (1-p)^{(4-i)}, \quad K_1^n = \frac{4}{3}; \quad (1.17)$$

$$P_c^3 = \sum_{i=4}^5 C_5^i \cdot p^i \cdot (1-p)^{(5-i)}, \quad K_1^n = \frac{5}{4}. \quad (1.18)$$

Поэтому условие $P_c > p$ может не выполняться, а показатели безотказности при кратном резервировании могут быть выше показателей безотказности при некрatном резервировании. Это обусловлено разными численностями параметров структур при кратном и некрatном резервировании. В рассматриваемом случае при заданном значении n в случае кратного резервирования число основных элементов $m = 1$, а в случаях некрatного резервирования m принимает значения 2, 3, 4... Как указано в [47] для любых структур некрatного резервирования выполняется соотношение:

$P_c(p, n, m) < p$, при p , близких к нулю и

$P_c(p, n, m) > p$, при p , близких к единице.

Причем, на открытом интервале $(0 - 1)$ зависимости $P_c(p, n, m)$ и $p(p)$ имеют одну точку пересечения, а уравнение

$$P_c(p, n, m) = p \quad (1.19)$$

имеет один вещественный корень. Значение вероятности, соответствующее этому корню, называют критическим значением и обозначают p_{kr} .

Таким образом, при некрatном пассивном резервировании существуют критические значения вероятностей элементов резервированных подсистем, которые разбивают интервал $(0 - 1)$ на два подинтервала:

- докритический $(0 - p_{kr})$, где $P_c(p, n, m) < p$ и пассивное резервирование не выгодно;

- закритический ($p_{kr}-1$), где $P_c(p, n, m) > p$ и пассивное резервирование выгодно.

Для расчета критических значений p_{kr} могут использоваться аналитические и численные методы. Аналитические методы трудоемкий и в большей степени могут представлять теоретический интерес. (Они сводятся к понижению порядка алгебраических уравнений не выше третьего - четвертого, для которых существуют формулы вычисления корней). Для практических целей более важными представляются численные методы. В таблице 1.4 представлены результаты расчетов критических значений вероятностей элементов пассивно резервированных подсистем p_{kr} , вычисленные на основании уравнения (1.12) и формулы (1.19) методом перебора с точностью 0,001, для допусков первого уровня и возрастающих кратностей в каждом из них, а в таблице 1.5 – аналогичные результаты для допусков второго уровня.

Таблица 1.4 Критические значения вероятностей p_{kr} для 11 возрастающих обобщенных кратностей, соответствующих 9 реализуемым допускам первого уровня

dW %	Обобщенные кратности резервирования K_i										
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}	K_{11}
50,0	-	233	348	396	422	438	449	456	462	467	470
33,3	500	653	679	687	690	691	691	691	691	691	691
25,0	768	803	804	801	799	796	794	792	790	789	787
20,0	869	871	865	859	855	851	848	846	844	842	840
16,7	917	908	900	893	889	885	882	879	877	875	873
14,3	943	930	921	915	910	907	904	901	899	897	896
12,5	958	945	936	930	926	922	919	917	915	913	912

11,1	968	955	947	941	937	934	931	929	927	925	924
10,0	975	963	955	950	946	943	940	938	936	934	933

Таблица 1.5 Критические значения вероятностей p_{kr} для 10 возрастающих кратностей, соответствующих 9 реализуемым допускам второго уровня

dW %	Обобщенные кратности резервирования K_i									
	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}	K_{11}
66,7	-	0,084	0,158	0,197	0,221	0,237	0,248	0,257	0,263	0,269
50,0	0,233	0,396	0,438	0,456	0,467	0,473	0,477	0,481	0,483	0,485
40,0	0,500	0,579	0,596	0,602	0,605	0,607	0,608	0,608	0,609	0,609
33,3	0,653	0,687	0,691	0,691	0,691	0,690	0,689	0,689	0,688	0,687
28,6	0,745	0,755	0,753	0,750	0,748	0,746	0,745	0,743	0,742	0,741
25,0	0,803	0,801	0,796	0,792	0,789	0,786	0,784	0,782	0,781	0,779
22,2	0,843	0,835	0,828	0,823	0,819	0,816	0,814	0,812	0,810	0,809
20,0	0,871	0,859	0,851	0,846	0,842	0,839	0,836	0,834	0,833	0,831
18,2	0,892	0,878	0,870	0,864	0,860	0,857	0,855	0,853	0,851	0,849

Первые клетки первых строк таблиц 1.4 и 1.5 соответствуют кратному резервированию и в дальнейшем не рассматриваются ввиду отсутствия для них критических значений p_{kr} внутри интервала вероятностей (0 – 1). Для экономии места в каждой клетке таблицы 1.4 представлены три десятичных знака (после запятой) рассчитанных значений критических вероятностей.

Для иллюстрации результатов, представленных в таблицах 1.4 и 1.5, на рисунках 1.1 и 1.2 показаны зависимости критических вероятностей p_{kr} от

кратностей для двух диапазонов допусков первого уровня, а на рисунке 1.3 и 1.4 аналогичные зависимости p_{kr} от кратностей для допусков второго уровня.

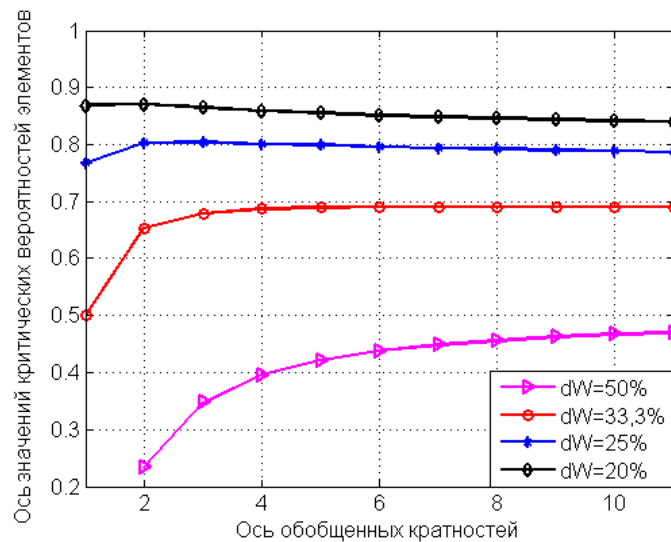


Рисунок 1.1 Зависимости p_{kr} от обобщенной кратности K_i для больших допусков первого уровня

Графики на рис.1.1 иллюстрируют разный характер (от монотонного возрастания до монотонного убывания) зависимости p_{kr} от обобщенной кратности K_i для больших допусков первого уровня.

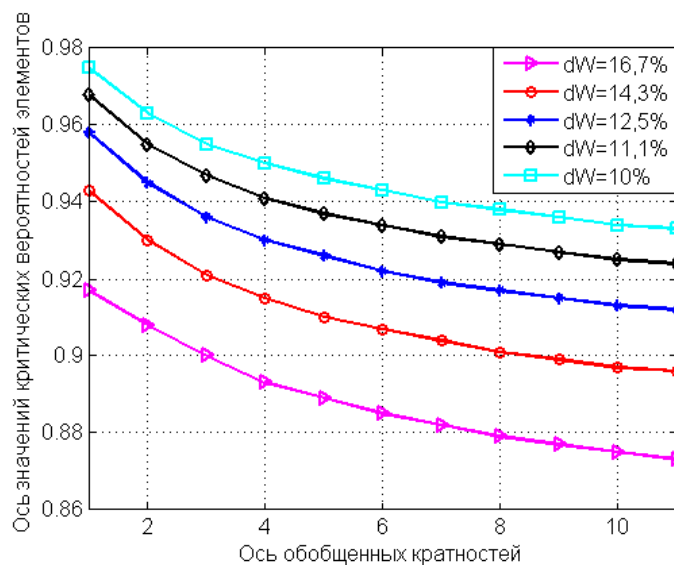


Рисунок 1.2 Зависимости p_{kr} от обобщенной кратности K_i для малых допусков первого уровня

Графики на рис.1.2 иллюстрируют однотипный монотонно убывающий характер зависимости p_{kr} от обобщенной кратности K_i для малых допусков первого уровня.

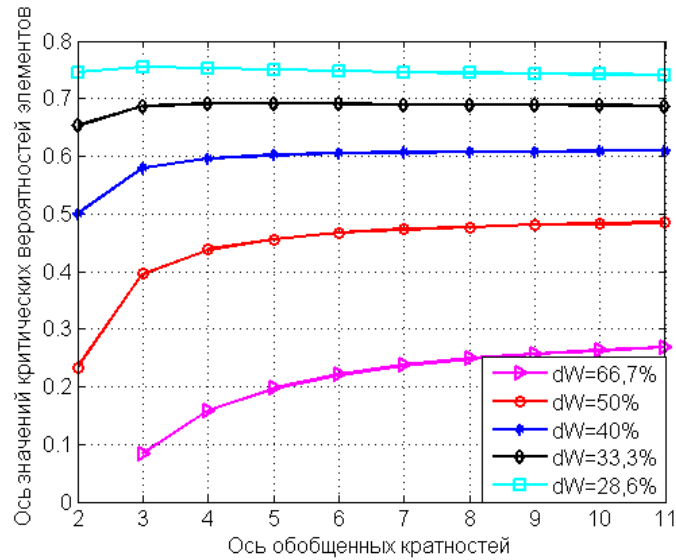


Рисунок 1.3 Зависимости p_{kr} от обобщенной кратности K_i для больших допусков второго уровня

Графики на рис.1.3 иллюстрируют разный характер (от монотонного возрастания до монотонного убывания) зависимости p_{kr} от обобщенной кратности K_i для больших допусков второго уровня.

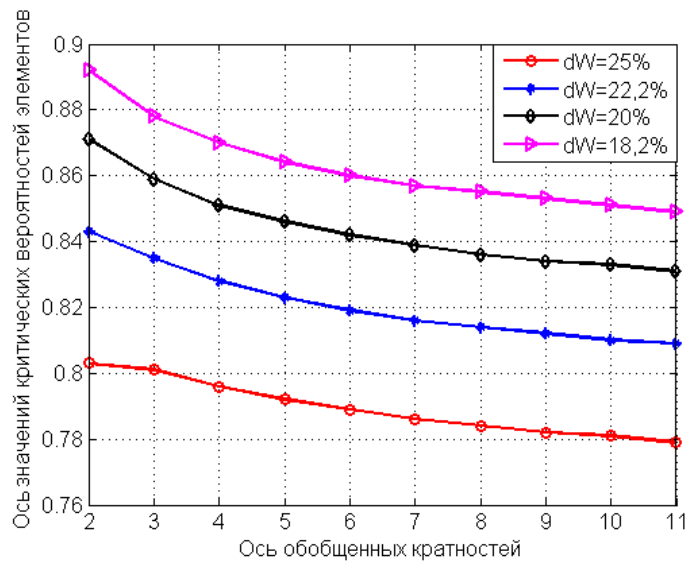


Рисунок 1.4 Зависимости p_{kr} от обобщенной кратности K_i для малых допусков второго уровня

Графики на рис. 1.4 демонстрируют однотипный монотонно убывающий характер зависимости p_{kr} от обобщенной кратности K_i для малых допусков первого уровня.

Для анализа влияния допусков на критические значения вероятностей на рисунках 1.5 и 1.6 показаны зависимости критических значений вероятностей от величин допусков первого и второго уровней для различных обобщенных кратностей резервирования.

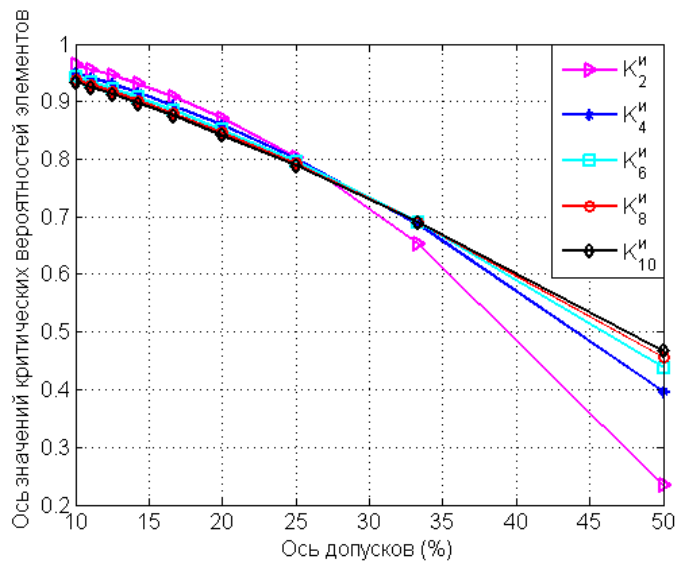


Рисунок 1.5 Зависимости p_{kr} от допусков первого уровня для значений K_i^H

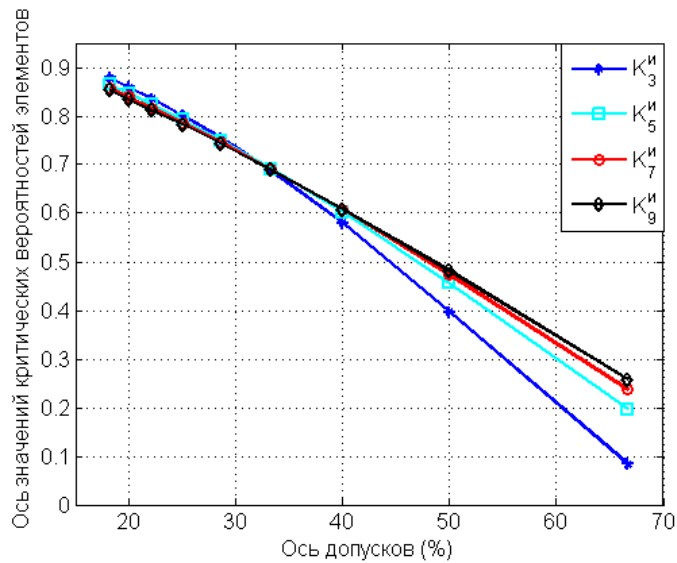


Рисунок 1.6. Зависимости p_{kr} от допусков второго уровня для значений K_i^H

Анализ представленных зависимостей для реализуемых допусков позволяет сделать следующие выводы:

1) Диапазон вероятностей элементов, в котором выгодно использовать данный вид резервирования, определяемый величиной p_{kr} зависит от трех факторов – уровня допуска, величины допуска, и кратности резервирования;

2) При фиксированных уровнях допусков и индивидуальных кратностей зависимости p_{kr} от величин убывающих допусков имеют монотонно возрастающий характер, стремящийся к 1 при допусках, стремящихся к 0. Это обусловлено тем, что при фиксированном уровне допуска $r = const$ стремление допуска к 0 связано со стремлением m и $n=r+m$ к бесконечности. При этом индивидуальные кратности стремятся к 1:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} K = \frac{n}{m} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n-r} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{n}{n}}{\frac{r}{n}} = 1.$$

Следовательно, структура пассивно резервированной подсистемы по характеристикам безотказности приближается к характеристикам нерезервированной подсистемы, у которой нет закритического диапазона и $p_{kr} = 1$;

3) При фиксированных величинах допусков первого уровня и индивидуальных кратностей зависимости p_{kr} от возрастающего уровня допуска имеют монотонно убывающий характер, стремящийся к 0 при уровне допуска, стремящегося к бесконечности. Это обусловлено тем, что при фиксированной величине допуска первого уровня $m = const$, стремление уровня допуска к бесконечности связано со стремлением r и $n=r+m$ к бесконечности. При этом индивидуальные кратности тоже стремятся к бесконечности:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} K = \frac{n}{m} = \frac{\infty}{m} = \infty.$$

Следовательно структура пассивно резервированной подсистемы по характеристикам безотказности приближается к характеристикам абсолютно надежной подсистеме с бесконечной кратностью резервирования, у которой закритическая область имеет максимальный размер (0 - 1) и $p_{kr} = 0$;

4) При фиксированной величине допуска и его уровня на характер зависимости p_{kr} от индивидуальной кратности существенное влияние оказывают и величина допуска, и его уровень. Так для каждого уровня допусков существуют равновесные значения dW_r , при которых критические значения p_{kr} практически не меняются в зависимости от индивидуальной и обобщенной кратностей. Для допусков первого уровня $dW_r = 25\%$, а для допусков второго уровня $dW_r = 28,6\%$. Характер изменения критических вероятностей в зависимости от соотношения dW_r и величин кратностей резко меняется - при допусках, меньших dW_r , критические значения возрастают, а при допусках, больших dW_r - убывают.

1.5 Выводы по главе 1

Данная глава представляет собой первую часть исследования, посвященного анализу и синтезу пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков. В главе получены следующие результаты:

1) Показана необходимость учета двух видов допусков – назначенных и реализуемых, принципиально отличающихся по способу задания. Первые задаются на непрерывной шкале значений, а вторые реализуются на дискретной шкале, определяемой структурой резервирования;

2) Выявлена возможность реализации любого допуска при различных значениях ряда возрастающих индивидуальных кратностей, что позволяет для заданного допуска ставить задачу поиска оптимальной индивидуальной кратности и соответствующей ей оптимальной структуры резервирования в интересах обеспечения максимальной безотказности резервированных подсистем;

3) Установлено, что пассивное резервирование с учетом допусков реализуется двумя принципиально разными способами – кратным и некратным резервированием;

4) Показано, что наиболее значимыми для практики по количеству разнообразию значений являются допуски, реализуемые методами некратного резервирования;

5) Показано, что подсистемы с некратным пассивным резервированием имеют значения вероятностей элементов, называемых критическими p_{kr} , которые определяют существование закритических областей ($0 - p_{kr}$), где резервирование не выгодно;

6) Выявлен разный характер изменения критических значений p_{kr} в зависимости от величины допуска и его уровня. При фиксированном уровне допуска и индивидуальной кратности зависимость p_{kr} от величины допуска имеет монотонно возрастающий характер, стремящийся к 1 при стремлении допуска к 0. При фиксированной величине допуска и индивидуальной кратности зависимость p_{kr} от уровня допуска имеет монотонно убывающий характер, стремящийся к 0 при стремлении уровня допуска к бесконечности;

7) Выявлен разный характер изменения критических значений p_{kr} в зависимости от индивидуальных кратностей для различных значений допусков и их уровней. Так при допусках первого уровня, больших 25%, с ростом кратности p_{kr} возрастают и, меньших 25%, с ростом кратности убывают. Аналогичный характер изменения p_{kr} имеет место относительно допуска 28,6% для допусков второго уровня.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ АНАЛИЗА ПАССИВНО РЕЗЕРВИРОВАННЫХ ПОДСИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ДОПУСКОВ И ИССЛЕДОВАНИЯ НА НЕЙ

Вторая глава посвящена разработке модели безотказности пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков и решению задачи анализа влияния существенных факторов на их безотказность. Поставлена задача анализа влияния существенных факторов на безотказность пассивно резервированных подсистем ЛА. Разработана методика ее решения. Исследовано влияние величин реализуемых допусков, кратностей резервирования и вероятностей безотказной работы элементов на показатель безотказности пассивно резервированных подсистем. Выявлены особенности влияния существенных факторов на показатель безотказности пассивно резервированных подсистем ЛА, позволяющие поставить задачу синтеза их структуры резервирования.

2.1 Формирование модели исследования

Согласно процедуре системного подхода, сформируем модель исследования путем отбора существенных факторов, т.е. факторов наиболее сильно влияющих на показатель безотказности подсистемы, при условии, что в рассматриваемом классе подсистем могут возникать только внезапные независимые отказы. В качестве критерия безотказности будем использовать, принятый в первом разделе показатель - вероятность безотказной работы подсистемы (элемента) за время выполнения задания.

Анализ особенностей этих подсистем, рассмотренных в разделе 1, показывает, что факторами, наиболее сильно влияющими на критерий безотказности подсистем являются: структура резервирования, безотказность элементов резервированной подсистемы, значения их критических вероятностей, назначенный и реализуемый допуски.

Проведем формализацию принятого критерия и существенных факторов. Введем следующие обозначения. Пусть T – случайное время нормального функционирования подсистемы или ее элемента до отказа, а t_3 – время выполнения подсистемой задания. Тогда вероятность безотказной работы резервированной подсистемы за время выполнения задания определяется выражением:

$$P_C(t_3) = P(T > t_3) = P_C, \quad (2.1)$$

а вероятность безотказной работы элемента резервированной подсистемы – выражением:

$$p(t_3) = P(T > t_3) = p. \quad (2.2)$$

Структура резервирования, как отмечалось в разделе 1, определяется тремя параметрами: количеством основных элементов m , количеством резервных элементов r и общим количеством элементов n , которые связаны равенством:

$$m + r = n \quad (2.3)$$

Из (2.3) следует, что для задания структуры резервирования достаточно указать любые два из трех параметров. Будем использовать параметры m и n , так как они помимо структуры определяют еще и кратность резервирования.

Как отмечалось, каждый реализуемый допуск может быть выполнен при разных значениях кратностей резервирования, образующих шкалу возрастающих кратностей, начиная с минимальной. Будем использовать реализуемые допуски только первого и второго уровней. Уровень реализуемого допуска определяется количеством резервных элементов r при минимальной кратности, а множество реализуемых допусков формируется при варьировании количества основных элементов m . Так допусками первого уровня при $r = 1$ и $m = 1, 2, 3 \dots$ являются:

$$dW_p = \frac{1}{1+1} \cdot 100\% = 50\%, \quad dW_p = \frac{1}{1+2} \cdot 100\% = 33,3\%, \quad dW_p = \frac{1}{1+3} \cdot 100\% = 25\% \quad \text{и т.д.}$$

Реализуемые допуски второго уровня, не совпадающие с допусками первого уровня определяются при $r = 2$ и $m = 1, 3, 5 \dots$: $dW_p = \frac{2}{2+1} \cdot 100\% = 66,7\%$,

$dW_p = \frac{2}{2+3} \cdot 100\% = 40\%$, $dW_p = \frac{2}{2+5} \cdot 100\% = 28,6\%$ и т.д. Причем, из первой главы следует, что реализуемый допуск должен определенным образом соотноситься с назначенным допуском, т.е. $dW_n \geq dW_p$.

Таким образом, зависимость критерия от существенных факторов имеет вид:

$$P_c = P_c(p, dW_p, dW_n, n, m, p_{kr}) \quad (2.4)$$

2.2 Постановка задачи анализа

При разработке пассивно резервированных подсистем с учетом допусков проектировщик должен иметь информацию о том, как влияют существенные факторы, на показатель безотказности. Для этого необходимо исследовать зависимость критериальной функции от существенных параметров. В связи с этим возникает необходимость решения задачи, которая в формализованном виде выглядит следующим образом:

$$P_c = P_c(p, m, n, dW_n, dW_p, p_{kr}), \quad (2.5)$$

при ограничениях:

$$dW_n \geq dW_p, \quad (2.6)$$

$$p > p_{kr}, \quad (2.7)$$

$$m, n > 0, \text{ целые.} \quad (2.8)$$

Словесно задача формулируется следующим образом: исследовать зависимость (2.5) от существенных параметров при ограничениях (2.6) – (2.8).

Назначенный допуск однозначно определяет реализуемый допуск как наибольшее значение в дискретной сетке реализуемых допусков, удовлетворяющее неравенству (2.6). Поэтому зависимость показателя безотказности от назначенного допуска можно исключить. Количество существенных параметров можно сократить еще на единицу, если вместо величин

m и n ввести параметр кратности резервирован. При некрatном резервировании кратность определяет эти две величины, а подавляющее количество допусков (более 99%) при решении данной задачи обеспечивается подсистемами с некрatным резервированием. Кроме того, критическая вероятность, как следует из гл.1, является зависимой величиной, которая определяется значениями кратности и реализуемого допуска. Таким образом, количество варьируемых параметров можно свести до трех: (p, K_i^n, dW_p) . Поэтому, исследование поведения критерия безотказности в задаче анализа будем проводить в зависимости от трех существенных параметров.

2.3 Методика решения задачи анализа

Для расчета показателя безотказности (2.5) при ограничениях (2.6) – (2.8) применим универсальный подход, часто используемый для расчета показателей надежности технических систем и их подсистем. Он заключается в построении их структурной схемы надежности (ССН). Структурная схема надежности подсистем представляет собой ориентированный граф, имеющий точку входа и точку выхода. При этом, подсистема считается исправной, если существует хотя бы один исправный путь, ведущий от входа к выходу ССН. Вид ССН определяется величинами реализуемого допуска и индивидуальной кратности резервирования.

Расчет показателя безотказности (2.5) при таком подходе состоит в построении ССН пассивно резервированной подсистемы и определении по ней вероятности исправности хотя бы одного пути от ее входа к выходу. Таким образом, решение поставленной задачи заключается в определении требуемого показателя (2.5) с учетом ограничений (2.6) – (2.8) по заданной структурной схеме надежности и известных показателях безотказности ее элементов.

Структурные схемы надежности любых систем и их подсистем (за исключением сетевых систем) при любых способах резервирования имеют вид параллельно – последовательного соединения их элементов. Поэтому они всегда могут быть разделены на участки с параллельным и последовательным

соединением элементов. Это упрощает построение структурных схем надежности. При построении этих участков используются два принципа. Участок ССН представляет собой последовательное соединение элементов, если для его нормального функционирования требуется исправная работа всех его элементов. Участок ССН представляет собой параллельное соединение элементов, если для его нормального функционирования требуется исправная работа хотя бы одного из его элементов.

При решении поставленной задачи реализуются подсистемы с кратным и некратным резервированием, ССН которых существенно различаются друг от друга. ССН подсистем с кратным пассивным резервированием с учетом допусков реализуются при $m = 1$ и любых $n > m$. Для нормального функционирования такой подсистемы требуется исправность хотя бы одного элемента. Отсюда следует, что ССН подсистем с кратным резервированием представляет собой параллельное соединение всех ее элементов.

Например, система питания топливом двигателя ЛА [6], содержащая 4 топливных насоса и обеспечивающая нормальное функционирование двигателя на всех режимах при исправной работе хотя бы одного топливного насоса, имеет вид четырех кратного резервирования. Она изображена на рисунке 2.1.

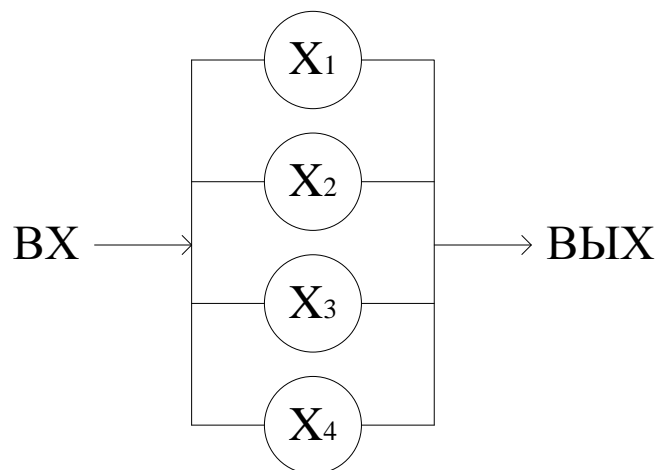


Рисунок 2.1 Структурная схема надежности системы питания топливом двигателя ЛА, при $m=1$ и $n = 4$

На представленном рисунке – x_i событие исправности i – го насоса. При принятом в работе предположении о независимости отказов ССН, изображенная на рис. 2.1, представляет собой сумму совместных независимых событий x_i , $i = 1, 2, 3, 4$. Принимая, что $P(x_i) = p$, показатель безотказности (2.5) проще вычислить по ССН через дополнительную вероятность:

$$P_c = 1 - p^4. \quad (2.9)$$

ССН подсистем с некрратным резервированием в данной задаче реализуются при $m \geq 2$ и $n \geq m$. Отсюда следует, что для нормального функционирования подсистем необходима исправность хотя бы одного пути из числа возможных, а каждый возможный путь представляет собой одно возможное сочетание из n элементов x_i по m элементов. Например, та же система питания топливом двигателя ЛА, содержащая четыре топливных насоса, но обеспечивающая нормальное функционирование двигателя на всех режимах при исправности не менее любых трех насосов, представлена на рисунке 2.2.

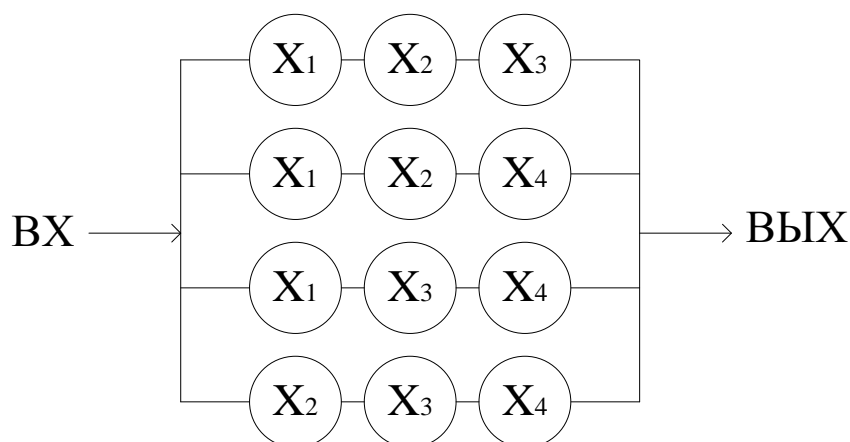


Рисунок 2.2 Структурная схема надежности системы питания топливом двигателя ЛА, при $m = 3$ и $n = 4$

ССН, представленная на рисунке 2.2, определяет искомый показатель P_c как вероятность суммы совместных и зависимых сложных событий A_1, A_2, A_3, A_4 , определяющих исправность соответствующих путей. Формула расчета безотказности имеет вид:

$$P_c = P\left(\sum_{i=1}^4 A_i\right), \quad (2.10)$$

где: $A_1 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$; $A_2 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_4$; $A_3 = x_1 \cdot x_3 \cdot x_4$; $A_4 = x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$; а $P(x_i) = p$, $i = 1, 2, 3, 4$.

Различные вероятностные и логико-вероятностные способы раскрытия выражения (2.10) (например, через сумму вероятностей совместных событий, несовместных событий, дополнительную вероятность и т.п.) приводят к разным расчетным формулам безотказности. Наиболее простой является формула, использующая биномиальный закон распределения:

$$P_c = \sum_{i=3}^4 C_4^i p^i \cdot (1-p)^{(4-i)}. \quad (2.11)$$

Она суммирует сгруппированные по одинаковым степеням p члены разложения бинома $(p + q)^4$, содержащих в качестве сомножителей не менее трех членов p в соответствии с условиями примера и структурной схемой надежности.

В общем случае при использовании данного подхода формула для расчета показателя безотказности (2.5) для подсистем с некратным резервированием подчиняется, как отмечалось в главе 1, биномиальному закону [74] и имеет вид, указанный в (2.12):

$$P_c = \sum_{i=m}^n C_n^i p^i \cdot (1-p)^{(n-i)}. \quad (2.12)$$

2.4 Исследование зависимости показателя безотказности от кратностей резервирования для различных вероятностей элементов и реализуемых допусков

Исследуем зависимость P_c от кратностей резервирования для различных значений безотказности элементов и реализуемых допусков пассивно резервированных подсистем. В связи с необходимостью проведения исследований в диапазоне вероятностей $p > p_{kr}$, а p_{kr} , как показано в [115], зависит от кратностей $K_i^и$ резервирования и величин реализуемых допусков, то сначала для каждого

допуска необходимо определить максимальное значение критической вероятности.

$$p_{krm} = \max_i P_{kr}(K_i^n). \quad (2.13)$$

Величина p_{krm} определяет начальные значения варьируемых вероятностей в диапазоне (p_{krm} – ПГ). ПГ – правая граница диапазона, которая меняется в зависимости от допуска. Она приблизительно определяется той величиной вероятности элемента резервированной подсистемы, при которой хотя бы одно значение из множества показателей безотказности в зависимости от кратности достигнет вероятности близкой к 1 (более 0,99). В этом диапазоне для каждого допуска будем задавать 7 примерно равномерно распределенных вероятностей элементов резервированной подсистемы для анализа поведения P_c .

Результаты подготовки исходных данных и некоторые результаты расчетов по ним показателя P_c для допусков первого уровня представлены в таблице 2.1 – 2.5 и иллюстрируются графиками на рисунках 2.3 – 2.7. Полные результаты расчетов и иллюстрирующие их графики можно найти в приложении А.

Таблица 2.1 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от K_i^n , p и допуска первого уровня $dW_p = 50\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,470	0,500	0,550	0,600	0,650	0,700	0,750
50,0	$K_1^n = 2$	0,719	0,750	0,797	0,840	0,877	0,910	0,937
	$K_2^n = 4/2$	0,641	0,687	0,758	0,821	0,873	0,916	0,949
	$K_3^n = 6/3$	0,598	0,656	0,745	0,821	0,883	0,929	0,962
	$K_4^n = 8/4$	0,569	0,637	0,740	0,826	0,894	0,942	0,973

$K_5^{\text{н}}=10/5$	0,547	0,623	0,738	0,834	0,905	0,953	0,980
$K_6^{\text{н}}=12/6$	0,530	0,613	0,739	0,842	0,915	0,961	0,986
$K_7^{\text{н}}=14/7$	0,515	0,605	0,741	0,850	0,925	0,968	0,990
$K_8^{\text{н}}=16/8$	0,502	0,598	0,744	0,858	0,933	0,974	0,992
$K_9^{\text{н}}=18/9$	0,491	0,593	0,747	0,865	0,940	0,979	0,995
$K_{10}^{\text{н}}=20/10$	0,480	0,588	0,751	0,872	0,947	0,983	0,996

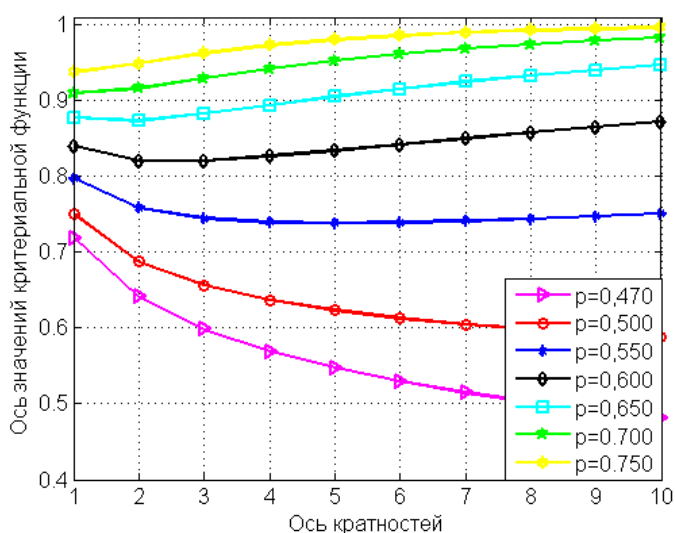


Рисунок 2.3 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p=50\%$

Первая строка таблицы 2.1 при допуске 50% задает значения показателя P_c для подсистем с кратным резервированием. Остальные клетки таблицы 2.1 и все клетки таблиц выборочно представленных результатов задают значения показателя P_c для подсистем с некратным резервированием. Графики на рис. 2.3 показывают, что при допуске 50% минимальные кратности резервирования

выгодно применять при безотказности элементов $p < 0,6$. При более высоких безотказностях элементов повышение индивидуальной кратности резервирования повышает безотказность резервированных подсистем.

Таблица 2.2 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от K_i^n , p и допуска первого уровня $dW_p = 33,3\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,691	0,725	0,750	0,775	0,800	0,825	0,850
33,3	$K_1^n = 3/2$	0,773	0,815	0,844	0,871	0,896	0,919	0,939
	$K_2^n = 6/4$	0,727	0,789	0,831	0,868	0,901	0,929	0,953
	$K_3^n = 9/6$	0,709	0,785	0,834	0,878	0,914	0,944	0,966
	$K_4^n = 12/8$	0,700	0,787	0,842	0,890	0,927	0,956	0,976
	$K_5^n = 15/10$	0,695	0,791	0,852	0,901	0,939	0,966	0,983
	$K_6^n = 18/12$	0,692	0,797	0,861	0,912	0,949	0,973	0,988
	$K_7^n = 21/14$	0,691	0,803	0,87	0,921	0,957	0,979	0,992
	$K_8^n = 24/16$	0,691	0,810	0,879	0,930	0,964	0,984	0,994
	$K_9^n = 27/18$	0,692	0,816	0,887	0,937	0,970	0,987	0,996
	$K_{10}^n = 30/20$	0,693	0,823	0,894	0,944	0,974	0,990	0,997

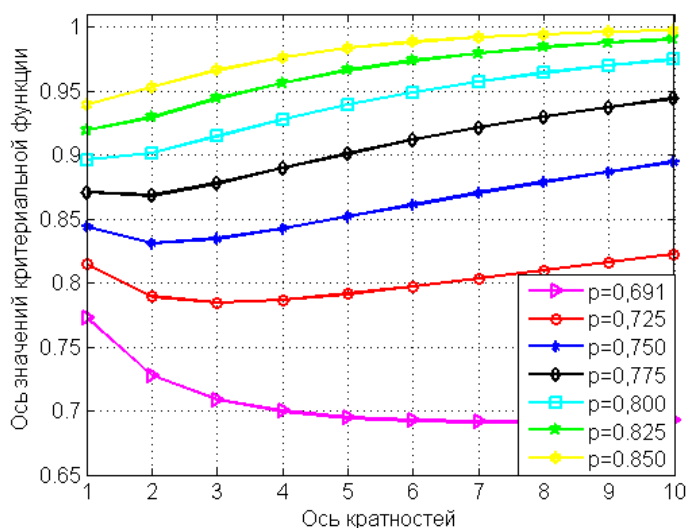


Рисунок 2.4 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p = 33,3\%$

Графики на рис. 2.4 показывают, что при допуске 33,3% зависимости P_c от K_i как и на предыдущем рисунке имеют разноплановый характер: при $p \geq 0,775$ они имеют вид монотонно возрастающих функций; при $p < 0,750$ они меняются от немонотонных функций (сначала убывают, а затем возрастают) до монотонно убывающих функций. Из графиков видно, что минимальные кратности резервирования выгодно применять при безотказности элементов $p < 0,725$. Вне этого диапазона повышение безотказности элементов позволяет повысить безотказность резервированной подсистемы. Из сравнения графиков на рисунках 2.3 и 2.4 видно, что с уменьшением допусков наблюдается смещение зависимостей $P_c(K_i)$ в сторону увеличения количества монотонно возрастающих функций.

Действительно, уже при допусках 25% и меньше увеличение кратности резервирования позволяет получить более высокие значения показателя P_c в закритической области, чем при минимальной кратности, хотя немонотонность функций $P_c(K_i)$ еще сохраняется при вероятностях элементов $p < 0,830$. Сказанное иллюстрируется таблицей 2.3 и графиками на рис. 2.5.

Таблица 2.3 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от K_i^n , p и допуска первого уровня $dW_p = 25\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,796	0,815	0,830	0,845	0,860	0,875	0,890
25,0	$K_1^n = 4/3$	0,813	0,842	0,863	0,884	0,903	0,921	0,938
	$K_2^n = 8/6$	0,788	0,829	0,859	0,886	0,911	0,933	0,951
	$K_3^n = 12/9$	0,784	0,833	0,868	0,898	0,925	0,947	0,965
	$K_4^n = 16/12$	0,786	0,841	0,879	0,911	0,938	0,959	0,975
	$K_5^n = 20/15$	0,791	0,850	0,890	0,923	0,949	0,969	0,982
	$K_6^n = 24/18$	0,797	0,860	0,901	0,934	0,959	0,976	0,988
	$K_7^n = 28/21$	0,803	0,869	0,911	0,943	0,966	0,982	0,991
	$K_8^n = 32/24$	0,810	0,878	0,919	0,950	0,972	0,986	0,994
	$K_9^n = 36/27$	0,816	0,886	0,927	0,957	0,977	0,989	0,996
	$K_{10}^n = 40/30$	0,823	0,893	0,934	0,963	0,981	0,992	0,997

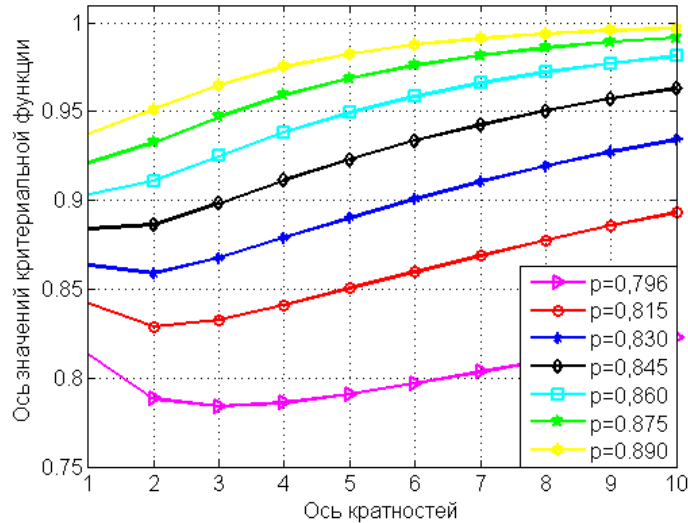


Рисунок 2.5 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p = 25\%$

Дальнейшее уменьшение реализуемых допусков приводит к тому, что при $dW_p \geq 20\%$ все зависимости $P_c(K_i)$ в закритической области приобретают монотонно возрастающий характер. Это иллюстрируется таблицами 2.4, 2.5 и графиками на рисунках 2.6, 2.7.

Таблица 2.4 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от K_i^H , p и допуска первого уровня $dW_p = 20\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,871	0,880	0,890	0,900	0,910	0,920	0,930
20,0	$K_1^H = 5/4$	0,873	0,888	0,903	0,919	0,933	0,946	0,958
	$K_2^H = 10/8$	0,872	0,891	0,912	0,930	0,946	0,96	0,972
	$K_3^H = 15/12$	0,882	0,904	0,926	0,944	0,96	0,973	0,982
	$K_4^H = 20/16$	0,894	0,917	0,939	0,957	0,971	0,982	0,989

$K_5^H = 25/20$	0,906	0,929	0,95	0,967	0,979	0,988	0,993
$K_6^H = 30/24$	0,917	0,939	0,959	0,974	0,985	0,992	0,996
$K_7^H = 35/28$	0,926	0,948	0,967	0,980	0,989	0,994	0,998
$K_8^H = 40/32$	0,935	0,956	0,973	0,985	0,992	0,996	0,998
$K_9^H = 45/36$	0,942	0,962	0,978	0,988	0,994	0,997	0,999
$K_{10}^H = 50/40$	0,949	0,968	0,982	0,991	0,996	0,998	0,999

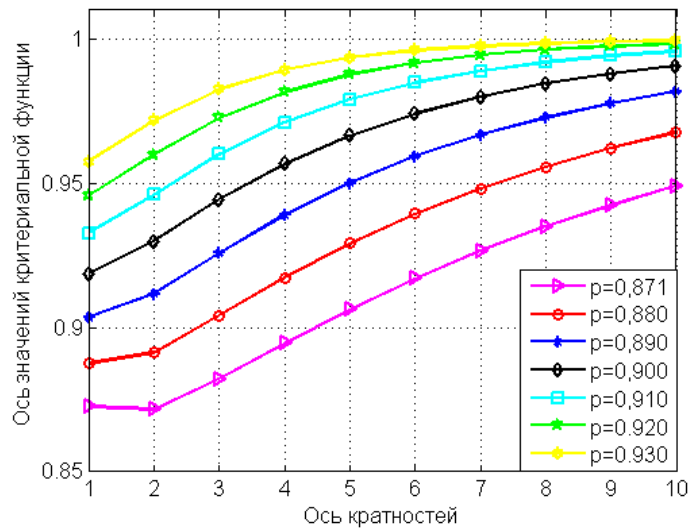


Рисунок 2.6 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p = 20\%$

Графики на рис. 2.6 и 2.7 показывают, что при допуске 20% и меньше минимальная кратность резервирования дает наихудшие значения показателей безотказности резервированных подсистем в закритической области.

Таблица 2.5 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от $K_i^н$, p и допуска первого уровня $dW_p = 10\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,975	0,978	0,981	0,984	0,987	0,990	0,993
10,0	$K_1^н = 10/9$	0,975	0,981	0,985	0,989	0,993	0,996	0,998
	$K_2^н = 20/18$	0,987	0,991	0,994	0,996	0,998	0,999	1,000
	$K_3^н = 30/27$	0,994	0,996	0,998	0,999	0,999	1,000	1,000
	$K_4^н = 40/36$	0,997	0,998	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_5^н = 50/45$	0,998	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_6^н = 60/54$	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_7^н = 70/63$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_8^н = 80/72$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_9^н = 90/81$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_{10}^н = 100/90$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

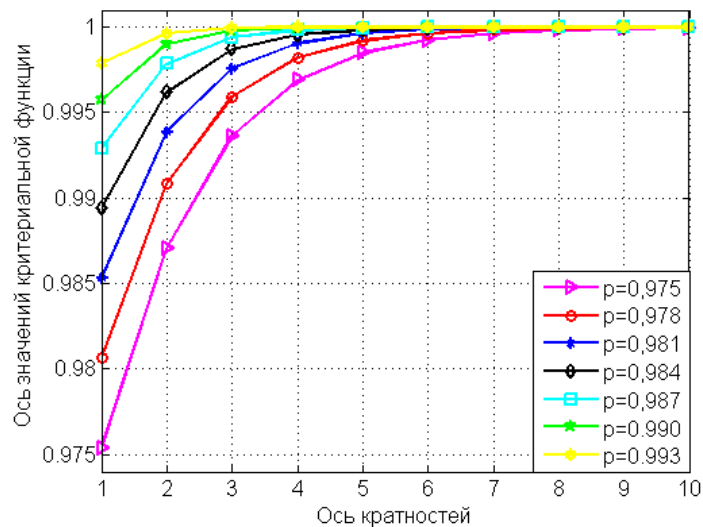


Рисунок 2.7 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p = 10\%$

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что для допусков первого уровня имеет место разный характер зависимостей критерия безотказности P_c от обобщенных кратностей резервирования K_i при изменении допусков и вероятностей элементов. Этот характер может меняться в широком диапазоне: от быстрого убывания до быстрого возрастания с увеличением кратности.

Для проверки устойчивости данного свойства некрatного пассивного резервирования подсистем с учетом допусков проведем аналогичный анализ поведения критерия безотказности P_c для допусков второго уровня, не повторяющихся с допусками первого уровня. Ниже выборочно представлены четыре таблицы и иллюстрирующие их графики, характерные для отражения имеющихся закономерностей. Более полные результаты расчетов и иллюстрирующие их графики можно найти в приложении А.

Таблица 2.6 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от K_i^u , p и допуска второго уровня $dW_p=66,7\%$

$dW_p\%$	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,269	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800
66,7	$K_2^u=3$	0,609	0,657	0,784	0,875	0,936	0,973	0,992
	$K_3^u=6/2$	0,511	0,580	0,767	0,891	0,959	0,989	0,998
	$K_4^u=9/3$	0,452	0,537	0,768	0,910	0,975	0,996	1,000
	$K_5^u=12/4$	0,411	0,507	0,775	0,927	0,985	0,998	1,000
	$K_6^u=15/5$	0,378	0,485	0,783	0,941	0,991	0,999	1,000
	$K_7^u=18/6$	0,350	0,466	0,791	0,952	0,994	1,000	1,000

$K_8^{\text{н}}=21/7$	0,327	0,449	0,800	0,961	0,996	1,000	1,000
$K_9^{\text{н}}=24/8$	0,306	0,435	0,808	0,968	0,998	1,000	1,000
$K_{10}^{\text{н}}=27/9$	0,288	0,423	0,816	0,974	0,999	1,000	1,000
$K_{11}^{\text{н}}=30/10$	0,271	0,411	0,824	0,979	0,999	1,000	1,000

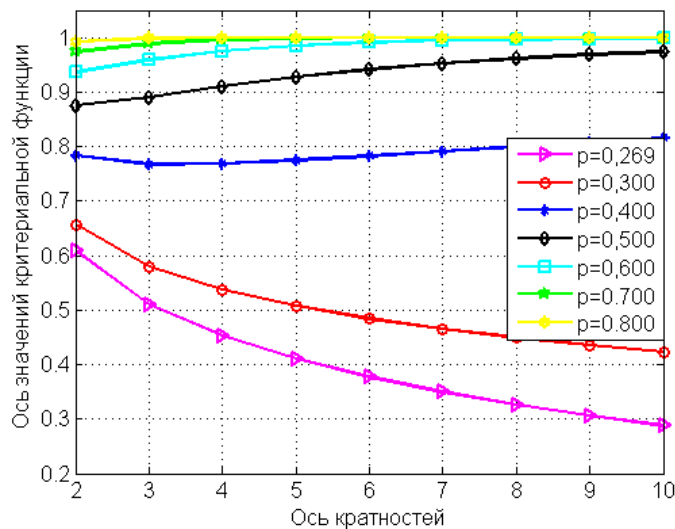


Рисунок 2.8 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p = 66,7\%$

Первая строка таблицы 2.6 при допуске 66,7% задает значения показателя P_c для подсистем с кратным резервированием. Остальные клетки таблицы 2.6 и все клетки нижеследующих двух таблиц задают значения показателя P_c для подсистем с некратным резервированием. Таблица 2.6 и графики на рис. 2.8 показывают, что при допуске 66,7% зависимости $P_c(K_i)$ имеют как и при допусках первого уровня разноплановый характер. Так, при безотказности элементов $p \geq 0,500$ зависимости $P_c(K_i)$ монотонно возрастают. Вне этого диапазона в закритической области зависимости $P_c(K_i)$ меняют свои свойства от не монотонного характера, до монотонно убывающих зависимостей. Причем, минимальные кратности резервирования выгодно применять при безотказности элементов $p < 0,4$. При более высоких безотказностях элементов повышение

индивидуальной кратности резервирования позволяет увеличить безотказность резервированных подсистем. Сравнение исследуемых зависимостей для двух максимальных допусков первого и второго уровней (табл. 2.1 и табл. 2.6) показывает, что с ростом уровня допуска граничное значение вероятности элементов, ниже которой выгодно применять минимальную кратность резервирования, снижается.

Таблица 2.7 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от K_i^n , p и допуска второго уровня $dW_p=40\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,610	0,650	0,690	0,730	0,770	0,810	0,850
40,0	$K_2^n=5/3$	0,700	0,765	0,823	0,874	0,916	0,949	0,973
	$K_3^n=10/6$	0,658	0,751	0,832	0,896	0,943	0,973	0,990
	$K_4^n=15/9$	0,641	0,755	0,849	0,918	0,963	0,986	0,996
	$K_5^n=20/12$	0,631	0,762	0,866	0,936	0,975	0,993	0,999
	$K_6^n=25/15$	0,626	0,771	0,881	0,950	0,984	0,996	1,000
	$K_7^n=30/18$	0,622	0,780	0,895	0,961	0,989	0,998	1,000
	$K_8^n=35/21$	0,620	0,789	0,907	0,969	0,993	0,999	1,000
	$K_9^n=40/24$	0,619	0,798	0,917	0,975	0,995	0,999	1,000
	$K_{10}^n=45/27$	0,618	0,806	0,926	0,980	0,997	1,000	1,000
	$K_{11}^n=50/30$	0,618	0,814	0,934	0,984	0,998	1,000	1,000

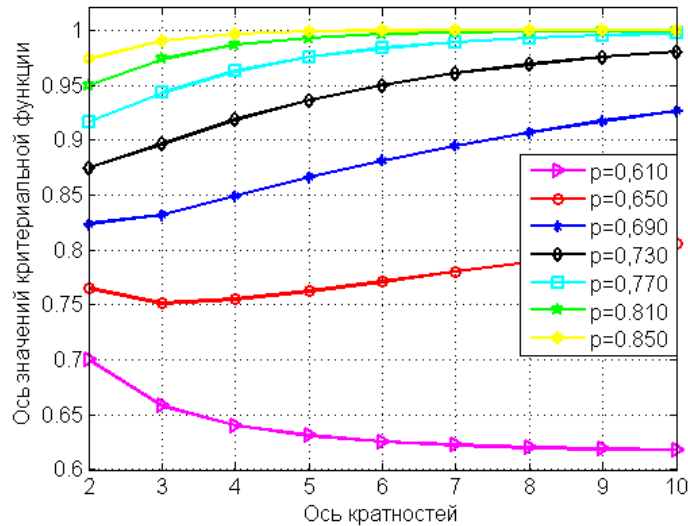


Рисунок 2.9 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p = 40\%$

Таблица 2.7 и графики на рис. 2.9 показывают, что при допуске 40% разноплановый характер зависимостей $P_c(K_i)$ сохраняется. Однако, как и при допусках первого уровня с уменьшением допусков происходит изменение зависимостей $P_c(K_i)$ в сторону увеличения количества монотонно возрастающих функций. Причем, минимальные кратности резервирования выгодно применять при безотказности элементов $p < 0,650$. Вне этого диапазона повышение безотказности элементов позволяет повысить безотказность резервированной подсистемы.

Таблица 2.8 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от K_i^n , p и допуска второго уровня $dW_p = 28,6\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,755	0,780	0,810	0,840	0,870	0,900	0,930
28,6	$K_2^n = 7/5$	0,767	0,816	0,869	0,913	0,949	0,974	0,990
	$K_3^n = 14/10$	0,756	0,824	0,891	0,941	0,973	0,991	0,998
	$K_4^n = 21/15$	0,761	0,840	0,913	0,961	0,986	0,997	1,000

$K_5^H = 28/20$	0,770	0,857	0,931	0,974	0,993	0,999	1,000
$K_6^H = 35/25$	0,780	0,872	0,945	0,983	0,996	1,000	1,000
$K_7^H = 42/30$	0,789	0,885	0,957	0,988	0,998	1,000	1,000
$K_8^H = 49/35$	0,799	0,897	0,965	0,992	0,999	1,000	1,000
$K_9^H = 56/40$	0,808	0,908	0,972	0,995	0,999	1,000	1,000
$K_{10}^H = 63/45$	0,817	0,918	0,978	0,996	1,000	1,000	1,000
$K_{11}^H = 70/50$	0,825	0,926	0,982	0,998	1,000	1,000	1,000

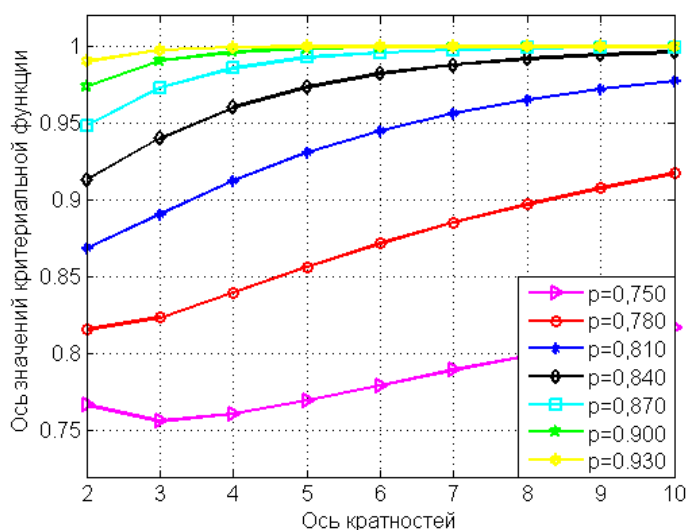


Рисунок 2.10 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p = 28,6\%$

Таблица 2.8 и графики на рис. 2.10 показывают, что при допуске 28,6% повышение кратности резервирования в закритической области позволяет получить значения безотказности резервированных подсистем выше, чем при минимальных кратностях резервирования. Однако не монотонный характер зависимостей $P_c(K_i)$ все еще сохраняется.

Таблица 2.9 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от K_i^n , p и допуска второго уровня $dW_p=22,2\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,843	0,860	0,880	0,900	0,920	0,940	0,950
22,2	$K_2^n=9/7$	0,844	0,880	0,917	0,947	0,970	0,986	0,992
	$K_3^n=18/14$	0,860	0,904	0,944	0,972	0,988	0,997	0,998
	$K_4^n=27/21$	0,881	0,927	0,964	0,985	0,996	0,999	1,000
	$K_5^n=36/28$	0,900	0,944	0,976	0,992	0,998	1,000	1,000
	$K_6^n=45/35$	0,915	0,957	0,985	0,996	0,999	1,000	1,000
	$K_7^n=54/42$	0,928	0,967	0,990	0,998	1,000	1,000	1,000
	$K_8^n=63/49$	0,939	0,975	0,993	0,999	1,000	1,000	1,000
	$K_9^n=72/56$	0,948	0,980	0,996	0,999	1,000	1,000	1,000
	$K_{10}^n=81/63$	0,956	0,985	0,997	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_{11}^n=90/70$	0,963	0,988	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000

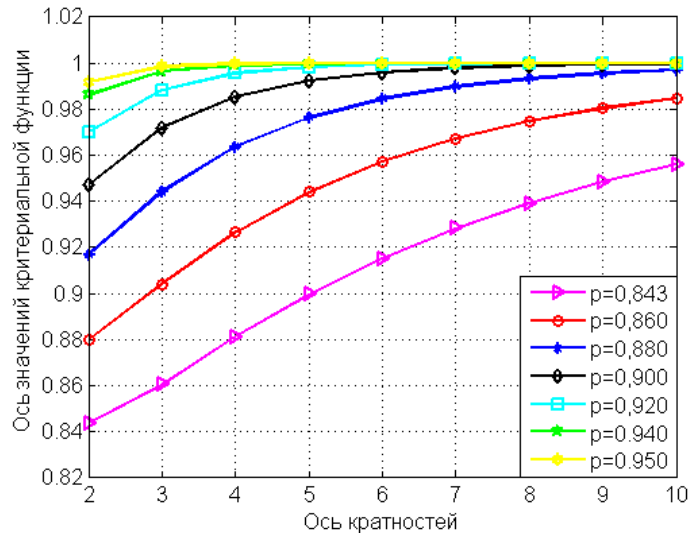


Рисунок 2.11 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p = 22,2\%$

Графики на рис. 2.11 показывают, что при допусках не выше 22,2% зависимости $P_c(K_i)$ приобретают однотипный монотонно возрастающий характер. При этом, минимальные кратности резервирования обеспечивают наихудшие значения безотказности резервированных подсистем

Расчеты, представленные в таблице 2.6 – 2.9, а также иллюстрирующие их графики, подтверждают устойчивость характера изменения зависимостей критерия безотказности P_c от обобщенных кратностей K_i при варьировании вероятностей элементов и допусков второго уровня.

Из таблиц 2.1 – 2.9 видно, что с уменьшением (“ужесточением”) реализуемых допусков одного уровня показатель безотказности пассивно резервированной подсистемы P_c падает при одинаковой безотказности элементов p и минимальных индивидуальных кратностях резервирования K_i^n . Например, при $dW_p = 50\%$, $K_1^n = 2$ и $p = 0,750$ – $P_c = 0,937$, а при $dW_p = 33,3\%$, $K_1^n = 3/2$ и $p = 0,750$ – $P_c = 0,844$. Аналогично, при $dW_p = 25,0\%$, $K_1^n = 4/3$ и $p = 0,890$ – $P_c = 0,938$, а при $dW_p = 20,0\%$, $K_1^n = 5/4$ и $p = 0,890$ – $P_c = 0,903$. Такая же ситуация имеет место и для реализуемых допусков второго уровня. Это объясняется тем, что при уменьшении реализуемых допусков одного уровня (при постоянном r), величины

n и m растут, приближаясь друг к другу и уменьшая тем самым, кратность резервирования.

В данном исследовании актуальным являлся вопрос: “Всегда ли надо выбирать минимальное значение кратности резервирования для удовлетворения требования по безотказности пассивно резервированных подсистем с учетом допусков как это утверждается в [47]”. Ответ на этот вопрос по результатам проведенных расчетов однозначен – “Нет”. Как показывает анализ таблиц 2.1 – 2.9, а также графиков, представленных на рисунках 2.3 – 2.11, не существует допусков (в рассмотренном наиболее важном их диапазоне), при которых всегда выгодно выбирать минимальную кратность резервирования подсистем в интересах повышения их безотказности.

Расчеты позволили установить, что минимальные кратности резервирования обеспечивают наилучшие показатели безотказности только при четырех допусках (из всей совокупности рассмотренных допусков двух уровней) в узких диапазонах вероятностей элементов:

$$dW_p = 50\%, p_{kr} = 0,470 < p < 0,600 \text{ (включая кратное резервирование);}$$

$$dW_p = 33,3\%, p_{kr} = 0,691 < p < 0,725 \text{ (некратное резервирование);}$$

$$dW_p = 66,7\%, p_{kr} = 0,269 < p < 0,400 \text{ (включая кратное резервирование);}$$

$$dW_p = 40\%, p_{kr} = 0,610 < p < 0,650 \text{ (некратное резервирование).}$$

Причем, два диапазона (первый и третий) включают по одной зависимости, соответствующей кратному резервированию и два диапазона (второй и четвертый), в которых все зависимости соответствуют некратному резервированию. Для остальных вероятностей в закритической области (где выгоден данный вид резервирования) четырех вышеуказанных допусков повышение кратности резервирования позволяет обеспечить более высокие показатели безотказности.

При других рассмотренных в работе допусках повышение кратности резервирования увеличивает безотказность во всем диапазоне вероятностей закритических областей. Первый и третий диапазоны показывают, что кратное резервирование выгоднее не кратного только при низких значениях безотказностей элементов: при $p < 0,600$ для первого диапазона; при $p < 0,400$ для второго диапазона. Причем эти значения уменьшаются с ростом уровня допусков ($0,400$ при $r = 2$ меньше $0,600$ при $r = 1$).

Таким образом, минимальные значения кратностей резервирования подсистем выгодно применять при больших допусках и при использовании в структурах резервирования малонадежных элементов. В подавляющем большинстве случаев для увеличения безотказности подсистем выгодно повышать кратность резервирования. Возникает вопрос: “В какой степени надо повышать кратность резервирования?” Ответ на этот вопрос дает решение задачи синтеза структуры резервирования с учетом допусков.

2.5 Выводы по главе 2

Одной из важных задач работы является формирование модели оценки безотказности пассивно резервированных подсистем с учетом допусков и исследование влияния на принятый показатель безотказности существенных факторов модели. В ходе работы было исследовано влияние на вероятность безотказной работы за время выполнения задания: структуры резервирования, величины реализуемого допуска и вероятности безотказной работы элементов резервированной подсистемы. В качестве параметра, определяющего структуру резервирования использовалась индивидуальная кратность резервирования. В результате проведенных во второй главе исследований были получены следующие результаты:

1. Наряду с безотказностью элементов важнейшей характеристикой, позволяющей повысить безотказность пассивно резервированных подсистем ЛА

при заданном назначенном допуске является индивидуальная кратность резервирования;

2. На характер зависимости показателя P_c от индивидуальной кратности резервирования существенное влияние оказывают величина реализуемого допуска и безотказность элементов;

3. Разный характер влияния безотказности элементов на зависимость показателя P_c от индивидуальной кратности резервирования сказывается только при больших допусках первого и второго уровней не менее 25,0%;

4. При реализуемых допусках менее 25% зависимость показателя P_c от индивидуальной кратности всегда имеет возрастающий характер, поэтому индивидуальная кратность резервирования является основным средством повышения безотказности пассивно резервированных подсистем рассматриваемого класса при “жестких” допусках;

5. В диапазоне реализуемых допусков не менее 25% в каждом допуске существуют значения безотказности элементов p , меняющих характер зависимости показателя P_c от индивидуальной кратности: так при безотказности элементов $p \geq 0,65$ зависимость показателя P_c от индивидуальной кратности при любом допуске данного диапазона всегда имеет возрастающий характер, а при $p < 0,65$ зависимость показателя P_c от индивидуальной кратности при любом допуске данного диапазона может как монотонно убывать, так и иметь немонотонный (сначала убывающий, а затем возрастающий) характер;

6. Минимальные величины индивидуальных кратностей резервирования обеспечивают наилучшие значения безотказности пассивно резервированных подсистем ЛА данного класса только при малонадежных элементах ($p < 0,600$) и больших реализуемых допусках (не менее 25,0%). Таким образом, не существует допусков, при которых всегда выгодно применять минимальную индивидуальную кратность резервирования (независимо от безотказности элементов);

7. Кратное резервирование обеспечивает более высокие показатели безотказности, чем некрatное резервирование (при неодинаковых, несравнимых численностях n и m) только при низкой безотказности элементов резервированных подсистем (менее 0,400 при допусках второго уровня и менее 0,600 для допусков первого уровня);

8. Повышение кратности некрatного резервирования является основным средством достижения высоких величин показателя P_c при “жестких” реализуемых допусках (менее 25,0%) и любых значениях безотказности элементов p , а также при больших допусках (не менее 25%) и безотказности элементов более 0,65;

9. Зависимости показателя P_c от безотказности элементов p в закритической области имеют нелинейный строго вогнутый характер при любых допусках и индивидуальных кратностях резервирования. Это говорит о существовании экстремума разности $(P_c - p)$, что позволяет ставить задачу разработки оптимальных высоконадежных пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков;

10. Исследования на модели с помощью разработанной методики показали широкие возможности для повышения безотказности пассивно резервированных подсистем с учетом допусков.

ГЛАВА 3 СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ ПАССИВНО РЕЗЕРВИРОВАННЫХ ПОДСИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ДОПУСКОВ

Третья глава посвящена задаче синтеза – выбору оптимальных параметров структур пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков на изменение их выходных характеристик при отказах элементов и предъявляемых к ним требований по безотказности. Показано, что синтез структуры основан на решении двух критериальной задачи оптимизации, которая разными способами может быть сведена к одному комплексному критерию. В работе выбраны два способа: способ линейной свертки и способ формирования отношения двух частных показателей. Поставлена задача синтеза структуры по двум комплексным критериям. В ходе исследования был проведен анализ влияния величин требуемой безотказности и допусков на оптимальную структуру пассивного резервирования подсистем ЛА по двум комплексным критериям.

3.1 Обсуждение проблемы синтеза структуры пассивного резервирования подсистем ЛА

Напомним важные для данного раздела основные положения, полученные в первой главе, необходимые для данного исследования. Шкалу допусков первого уровня удобно реализовать при использовании минимальных значений параметров структур n_m и m_m определяемых $r = 1$, путем варьирования общего количества элементов $n = 2, 3, 4, 5, \dots$. Таким способом можно получить шкалу допусков первого уровня: 50%; 33,3%; 25%; 20%; 16,7%; 14,3%; 12,5%; 11,1%; 10% и т.д. Аналогично, шкалу допусков второго уровня удобно реализовать при использовании минимальных значений параметров структур n_m и m_m , определяемых $r = 2$, путем варьирования $n = 3, 4, 5, 6, \dots$. Так получается шкала допусков второго уровня: 66,7%; 50%; 40%; 33,3%; 28,6%; 25%; 22,2%; 20%; 18,2% и т.д. Как отмечалось, каждый допуск может обеспечиваться разными структурами, реализуемыми шкалой возрастающих индивидуальных кратностей, начиная с минимальной кратности.

Сопоставим друг с другом вероятность безотказной работы пассивно резервированной подсистемы с вероятностью безотказной работе ее элементов за время выполнения задания. Для расчета показателя безотказности (1.10) как и раньше будем использовать формулу биномиального закона распределения:

$$P_c = \sum_{i=m}^n C_n^i \cdot p^i \cdot (1-p)^{(n-i)}. \quad (3.1)$$

Параметры n и m формулы (3.1) определяются кратностью резервирования, а каждому допуску, как указывалось выше, соответствует свое множество возрастающих индивидуальных кратностей. Поэтому целесообразно, используя данную формулу, исследовать функциональную зависимость P_c от p для различных индивидуальных кратностей $K_i^И$ и допусков первого и второго уровней. Для выявления свойств и закономерностей указанной функциональной зависимости построим в одних осях координат функции $P_c(p, K_i^И)$ и $p(p)$ для различных допусков первого и второго уровней.

На рисунках 3.1 – 3.6 выборочно представлены зависимости P_c от p и $K_i^И$ для допусков 50%, 33,3% и 16,7% первого уровня, а также 66,7%, 40% и 22,2% второго уровня для пяти индивидуальных кратностей. Полный набор указанных зависимостей можно найти в приложении Б.

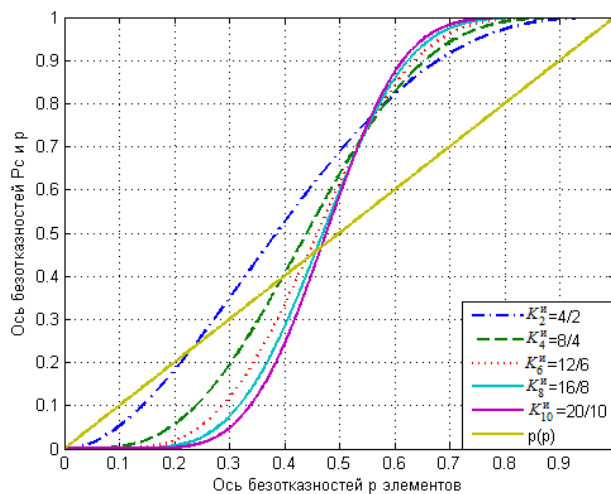


Рисунок 3.1 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, $dW_p = 50\%$

Графики на рис. 3.1 показывают изменение критических вероятностей, определяемых точкой пересечения зависимости $P_c(p)$ и $p(p)$ и наличие экстремума разности $(P_c - p)$ частных показателей при любых индивидуальных кратностях для $dW_p = 50\%$.

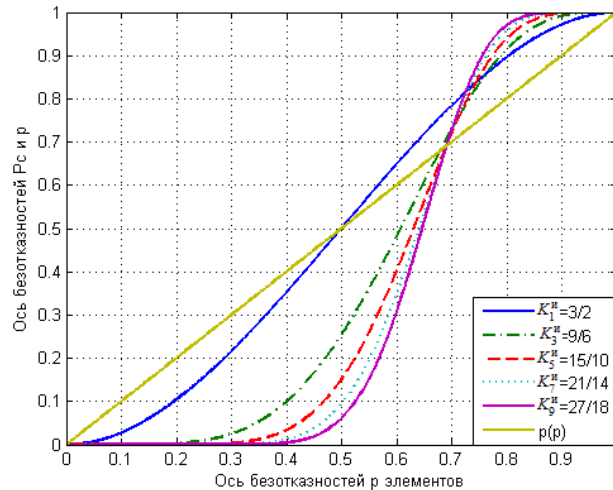


Рисунок 3.2 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, $dW_p = 33,3\%$

Графики на рис. 3.2 показывают наличие экстремума разности $(P_c - p)$ частных показателей, как и при допуске 50%, при любых индивидуальных кратностях для $dW_p = 33,3\%$.

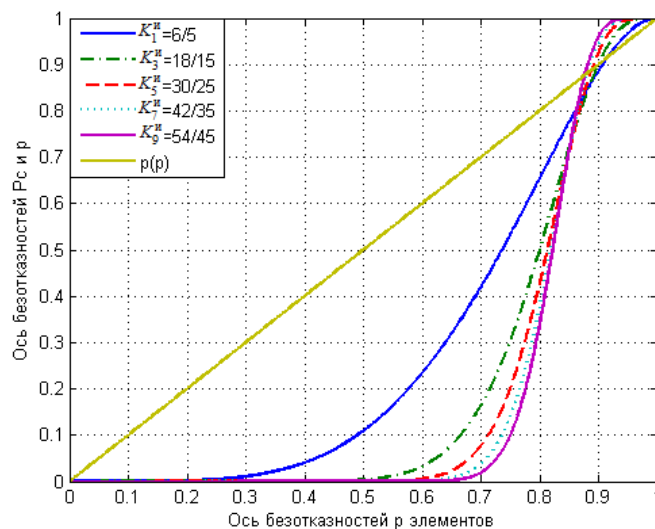


Рисунок 3.3 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, $dW_p = 16,7\%$

Представленные графики на рис. 3.1 – 3.3 позволяют сделать вывод о существовании экстремума разности ($P_c - p$) частных показателей при любых индивидуальных кратностях и при любых допусках первого уровня.

Рассмотренные графики наглядно показывают как меняются критические вероятности с уменьшением допусков и возрастанием индивидуальных кратностей резервирования, насколько сильно максимальное значение критической вероятности отличается от ее минимального значения, а также то, что при каждом допуске в закритической области большему значению индивидуальной кратности соответствует большее значение показателя безотказности резервированной подсистемы. Проанализируем существование аналогичных свойств для допусков второго уровня.

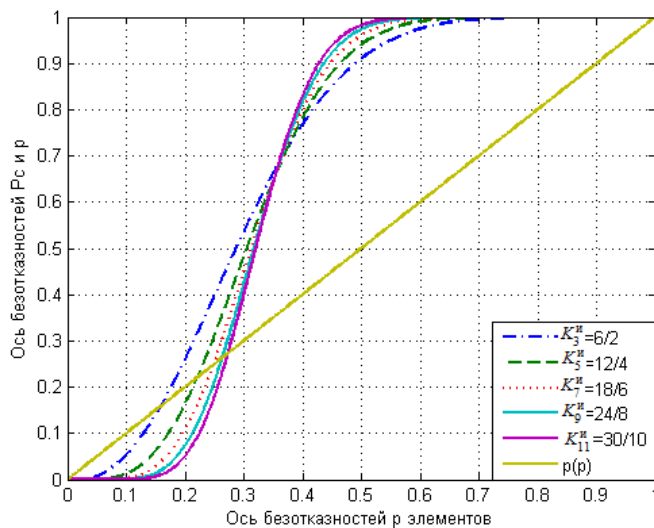


Рисунок 3.4 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, $dW_p = 66,7\%$

Графики на рис. 3.4 показывают наличие экстремума разности ($P_c - p$) частных показателей при любых индивидуальных кратностях для $dW_p = 66,7\%$.

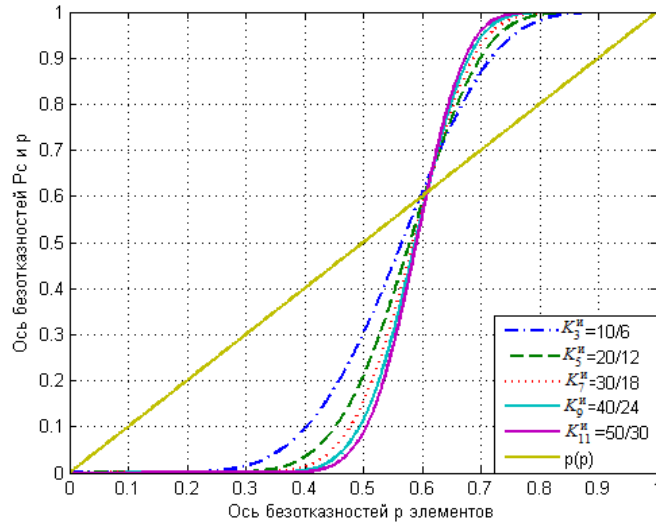


Рисунок 3.5 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, $dW_p = 40\%$

Графики на рис. 3.5 подтверждают наличие экстремума разности $(P_c - p)$ частных показателей при любых индивидуальных кратностях для $dW_p = 40\%$.

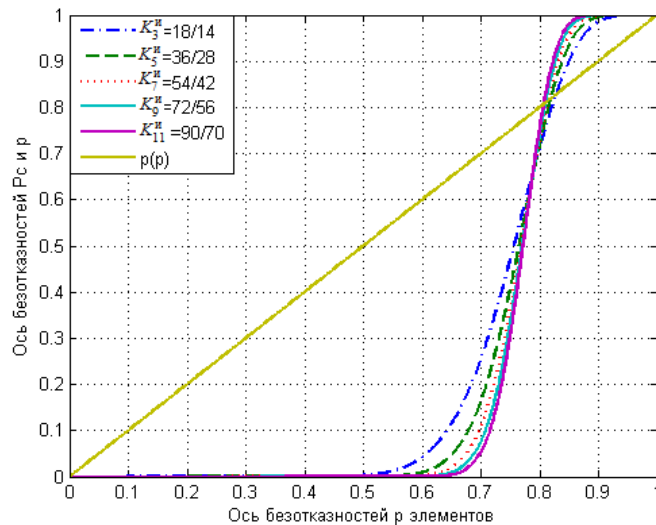


Рисунок 3.6 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, $dW_p = 22,2\%$

Графики на рис. 3.1 – 3.6 указывают на существование общего свойства у функций $P_c(p)$, заключающегося в наличии экстремума разности $(P_c - p)$ частных показателей при любых индивидуальных кратностях и любых допусках первого и второго уровней.

Таким образом из представленных графиков можно сделать следующие общие выводы:

1. В каждом допуске для каждой индивидуальной кратности резервирования существует экстремальное значение безотказности резервированной подсистемы по отношению к безотказности элементов – экстремум разности $(P_c - p)$, определяющий наилучшие в определенном смысле структуры резервирования;
2. С ужесточением допусков для всех, связанных с ними значений индивидуальной кратностей, экстремальные значения безотказности возрастают;
3. В каждом допуске экстремальные значения безотказности пассивно резервированной подсистемы также возрастают с увеличением индивидуальной кратности резервирования.

Последние два свойства позволяют поставить задачу синтеза, то есть выбора оптимальных параметров структуры пассивного резервирования подсистем ЛА с учетом предъявляемых к ним требований по безотказности и назначенному допуску.

3.2 Постановка задачи синтеза структуры пассивного резервирования подсистем ЛА

Одна из задач, стоящих перед разработчиками подсистем ЛА заключается в создании высоконадежных объектов из сравнительно малонадежных, как правило, дешевых элементов. Применительно к рассматриваемой задаче это означает, что оптимальная структура пассивного резервирования должна соответствовать таким значениям n и m , при которых безотказность резервированной подсистемы была бы как можно выше, а безотказность входящих в нее элементов – как можно ниже.

Возникает задача оптимизации по двум показателям:

- показателю безотказности резервированной подсистемы

$$P_c = \sum_{i=m}^n C_n^i \cdot p^i \cdot (1-p)^{(n-i)} \rightarrow \max ; \quad (3.2)$$

- показателю безотказности элементов резервированной подсистемы

$$p(p) \rightarrow \min. \quad (3.3)$$

Как известно, задача оптимизации по многим критериям в одной области допустимых решений является математически не корректной [19]. Это обусловлено тем, что при неодинаковых критериальных функциях не существует единственного значения оптимизируемых параметров, доставляющих экстремум одновременно всем этим критериям. Общий подход, который применяется при оптимизации по многим критериям заключается в поиске компромиссного решения. Это решение, как правило, не доставляет экстремума ни одному оптимизируемому частному показателю, но обеспечивает определенный компромисс между ними. Это компромиссное решение в значительной степени определяется способом сведения частных показателей к одному комплексному критерию и зависит от целей и задач, стоящих перед разработчиком.

Существующие методы поиска компромиссных решений в задачах оптимизации по многим критериям можно разделить на две группы: математические методы и эвристические методы, основанные на экспертных оценках. Оставляя в стороне эвристические методы, рассмотрим особенности математических методов, применяемых в диссертационном исследовании.

Будем использовать математические методы сведения частных показателей к одному комплексному критерию для поиска компромиссного решения. Из существующих математических методов сведения частных показателей к одному комплексному критерию для диссертационного исследования в наибольшей степени подходят 2 метода:

- метод линейной свертки и
- метод построения относительного критерия.

Комплексный критерий данной работы в виде линейной свертки представляется так:

$$\Delta P_c = P_c + p. \quad (3.4)$$

Одно из условий сведения частных показателей в виде линейной свертки к одному комплексному критерию является одинаковый характер оптимизации частных показателей: либо все максимизируются, либо все минимизируются [19]. Поэтому, заменяя минимизацию частного показателя на максимизацию, комплексный критерий представим в следующем виде:

$$\Delta P_c = P_c + (-p) = P_c - p, \quad (3.5)$$

где: $P_c \rightarrow \max$, $-p \rightarrow \max$, $\Delta P_c \rightarrow \max$.

Другим условием целесообразности такого сведения является требование однотипности сводимых частных показателей. Комплексный критерий (3.5) удовлетворяет этому требованию, так как оба частных показателя представляют собой вероятности.

Второй подход заключается в формировании отношения двух показателей. Это отношение можно сформировать двумя способами:

$$dP_c = \frac{P_c}{p}, \quad (3.6)$$

где: $P_c \rightarrow \max$, $p \rightarrow \min$, $dP_c \rightarrow \max$, или

$$dP_c = \frac{(P_c - p)}{p} = \frac{P_c}{p} - 1, \quad (3.7)$$

где: $\Delta P_c \rightarrow \max$, $p \rightarrow \min$, $dP_c \rightarrow \max$.

В этом подходе частные показатели могут иметь разную размерность, разный тип и разный характер оптимизации. Вид оптимизации комплексного относительного критерия зависит от характера оптимизации частного показателя, стоящего в числителе.

Критерии (3.6) и (3.7) во втором подходе дают один и тот же результат синтеза. Однако разница в результатах синтеза по критериям (3.4) и (3.6 или 3.7) может быть существенна. Оба подхода, в отличие от известных других способах свертки частных показателей имеют ясный смысл. Комплексный критерий (3.4) показывает на сколько показатель безотказности резервированной подсистемы выше безотказности входящих в нее элементов в абсолютном представлении. Комплексный критерий (3.6 и 3.7) показывает во сколько раз показатель безотказности резервированной подсистемы выше безотказности входящих в нее элементов в относительном представлении.

Необходимым условием нахождения компромиссного решения при использовании математических методов является существование экстремума у комплексных критериев. Существование экстремальных значений безотказности резервированных подсистем по отношению к безотказности элементов в каждом допуске при любой индивидуальной кратности установлено в главе 2.

Не являясь разработчиком систем и их подсистем и следовательно, не имея возможности выбрать единственный комплексный критерий исходя из целей и задач проектирования конкретных изделий поставим задачу синтеза по двум комплексным критериям: линейному и относительному. Выберем для дальнейшего использования комплексный относительный критерий (3.7). В этом случае, математическая постановка задачи синтеза структуры пассивного резервирования подсистем ЛА по двум комплексным критериям с учетом, предъявляемых к ним требований по безотказности [63, 89] и допуску [47] выглядит следующим образом:

$$\Delta P_C^* = \max_{(p, K_i^n)} (P_C(p, K_i^n, dW_p, P_{\text{тр}}, dW_n, p_{kr}) - p), \quad (3.8)$$

$$dP_C^* = \max_{(p, K_i^n)} (P_C(p, K_i^n, dW_p, P_{\text{тр}}, dW_n, p_{kr}) - p) / p. \quad (3.9)$$

При ограничениях:

$$p^* > p_{kr}, \quad (3.10)$$

$$dW_p \leq dW_n, \quad (3.11)$$

$$P_c^* \geq P_{тр}, \quad (3.12)$$

$$K_i^n = \frac{n_i}{m_i}, \quad n_i, m_i > 0, \text{ целые.} \quad (3.13)$$

3.3 Методика решения задачи синтеза структуры пассивно резервированных подсистем с учетом допусков

Пусть задано значение назначенного допуска dW_n , а также требуемой безотказности $P_{тр}$ резервированной подсистемы ЛА. Назначенный допуск dW_n позволяет определить по сетке реализуемых допусков первого и второго уровней ближайшую к нему величину dW_p в соответствии с условием (3.11). Найденный реализуемый допуск, как отмечалось, обеспечивается множествами возрастающих индивидуальных кратностей K_i^n , начиная с минимальной. Причем, каждая кратность задает параметры n_i и m_i определенной структуры резервирования.

В связи с отсутствием информации по требуемой безотказности подсистем будем сначала решать, так называемую, ослабленную задачу синтеза по двум комплексным критериям, которая выглядит следующим образом:

$$\Delta P_c^* = \max_{(p)} (P_c(p, K_i^n, dW_p, dW_n, p_{kr}) - p), \quad (3.14)$$

$$dP_c^* = \max_{(p)} (P_c(p, K_i^n, dW_p, dW_n, p_{kr}) - p) / p. \quad (3.15)$$

При ограничениях:

$$p^* > p_{kr}, \quad (3.16)$$

$$dW_p \leq dW_n, \quad (3.17)$$

$$K_i^n = \frac{n_i}{m_i}, \quad n_i, m_i > 0, \text{ целые.} \quad (3.18)$$

Ослабленная задача не учитывает ограничение по безотказности резервированной подсистемы (3.12) исходной задачи. Ее решение позволяет найти зависимости оптимальных значений интересующих комплексных критериев ΔP_C^* , dP_C^* и доставляющих эти значения частных показателей $P_{c\Delta}^*$, p_Δ^* и P_{cd}^* , p_d^* от индивидуальных кратностей резервирования K_i^n соответственно:

$$\Delta P_C^* = \Delta P_C^*(K_i^n), \quad (3.19)$$

$$P_{c\Delta}^* = P_{c\Delta}^*(K_i^n), \quad (3.20)$$

$$p_\Delta^* = p_\Delta^*(K_i^n), \quad (3.21)$$

$$dP_C^* = dP_C^*(K_i^n), \quad (3.22)$$

$$P_{cd}^* = P_{cd}^*(K_i^n), \quad (3.23)$$

$$p_d^* = p_d^*(K_i^n). \quad (3.24)$$

Как показывают графики, представленные на рисунках 3.1 – 3.6 и сделанный по ним вывод 3 зависимость $P_C^*(K_i^n)$ имеет возрастающий характер с увеличением индивидуальной кратности резервирования K_i^n , при любых реализуемых допусках. Это обстоятельство позволяет решить исходную задачу синтеза, т. е. найти такие значения индивидуальных кратностей K_i^n , при которых выполняется условие $P_C^* \geq P_{тр}$ в расчетах по каждому из двух комплексных критериев.

Следует отметить, что зависимости $\Delta P_C^*(K_i)$ и $dP_C^*(K_i)$ представляют интерес лишь в той мере, в какой они определяют искомые зависимости $P_{c\Delta}^*(K_i)$,

$p_{\Delta}^*(K_i)$ и $P_{cd}^*(K_i)$, $p_d^*(K_i)$. Действительно, частные показатели $P_{c\Delta}^*(K_i)$ и $P_{cd}^*(K_i)$ обеспечивают выполнение требований по безотказности, предъявляемых к пассивно резервированным подсистемам ЛА при решении задачи синтеза по комплексным линейному и относительному критериям, в то время как частные показатели $p_{\Delta}^*(K_i)$ и $p_d^*(K_i)$ обеспечивают выполнение требований по безотказности, предъявляемых к элементам пассивно резервированных подсистем ЛА при решении задачи синтеза по тем же комплексным критериям. Именно поведение указанных частных показателей является целью последующих расчетов.

Решение ослабленной задачи можно находить методом деления отрезка пополам и другими способами, однако проще всего найти решение методом перебора. При заданном значении реализуемого допуска dW_p и множестве обеспечивающих этот допуск индивидуальных кратностей $K_i^и$ организуется перебор значений вероятностей элементов p в закритической области $(p_{kr} - 1)$ и вычисление максимальных значений комплексных критериев. Шаг перебора определяет точность вычисления оптимальных значений комплексных критериев ΔP_c^* , dP_c^* , а также соответствующих им частных показателей. Найденные таким образом зависимости $\Delta P_c^* = \Delta P_c^*(K_i^и)$, $P_{c\Delta}^* = P_{c\Delta}^*(K_i^и)$, $p_{\Delta}^* = p_{\Delta}^*(K_i^и)$, $dP_c^* = dP_c^*(K_i^и)$, $P_{cd}^* = P_{cd}^*(K_i^и)$, $p_d^* = p_d^*(K_i^и)$ позволяют найти решение искомой задачи синтеза по двум комплексным критериям.

3.4 Решение задачи синтеза по комплексному линейному критерию

Как отмечалось, ввиду отсутствия информации о количественных значениях назначенных допусков и требуемой безотказности реальных подсистем ЛА, проведем расчеты зависимостей (3.19), (3.20), (3.21) для всего диапазона рассмотренных реализуемых допусков первого и второго уровней. В таблице 3.1

представлены результаты расчетов оптимальных значений ΔP_C^* , $P_{c\Delta}^*$ и p_Δ^* для десяти кратностей и допусков первого уровня, а в таблице 3.2 – аналогичные результаты для девяти кратностей и допусков второго уровня. Данные результаты вычислены с точностью 0,001.

Таблица 3.1 Оптимальные значения комплексного линейного критерия ΔP_C^* и частных показателей $P_{c\Delta}^*$ и p_Δ^* для реализуемых допусков первого уровня и 10 обобщенных кратностей

dW_p %	Пара метры	Обобщенные кратности K_i									
		K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}
50	ΔP_C^*	-	0,224	0,233	0,245	0,257	0,267	0,276	0,284	0,291	0,297
	$P_{c\Delta}^*$	-	0,863	0,898	0,915	0,926	0,934	0,940	0,944	0,948	0,951
	p_Δ^*	-	0,639	0,665	0,670	0,669	0,667	0,664	0,660	0,657	0,654
	n^*, m^*	-	4,2	6,3	8,4	10,5	12,6	14,7	16,8	18,9	20,10
33,3	ΔP_C^*	0,096	0,104	0,119	0,131	0,141	0,150	0,157	0,164	0,170	0,175
	$P_{c\Delta}^*$	0,885	0,933	0,947	0,954	0,958	0,962	0,964	0,967	0,969	0,970
	p_Δ^*	0,789	0,829	0,828	0,823	0,817	0,812	0,807	0,803	0,799	0,795
	n^*, m^*	3,2	6,4	9,6	12,8	15,10	18,12	21,14	24,16	27,18	30,20
25	ΔP_C^*	0,048	0,062	0,075	0,085	0,094	0,101	0,107	0,112	0,117	0,121
	$P_{c\Delta}^*$	0,944	0,961	0,967	0,970	0,973	0,974	0,976	0,977	0,978	0,979

	p_{Δ}^*	0,896	0,899	0,892	0,885	0,879	0,873	0,869	0,865	0,861	0,858
	n^*, m^*	4,3	8,6	12,9	16,12	20,15	24,18	28,21	32,24	36,27	40,30
20	ΔP_c^*	0,028	0,042	0,053	0,062	0,069	0,075	0,080	0,084	0,088	0,092
	$P_{c\Delta}^*$	0,968	0,975	0,977	0,979	0,980	0,981	0,982	0,983	0,984	0,985
	p_{Δ}^*	0,940	0,933	0,924	0,917	0,911	0,906	0,902	0,899	0,895	0,893
	n^*, m^*	5,4	10,8	15,12	20,16	25,20	30,24	35,28	40,32	45,36	50,40
16,7	ΔP_c^*	0,018	0,030	0,040	0,048	0,054	0,059	0,063	0,067	0,070	0,073
	$P_{c\Delta}^*$	0,979	0,981	0,983	0,984	0,985	0,986	0,986	0,987	0,987	0,987
	p_{Δ}^*	0,961	0,951	0,943	0,936	0,931	0,927	0,923	0,920	0,917	0,914
	n^*, m^*	6,5	12,10	18,15	24,20	30,25	36,30	42,35	48,40	54,45	60,50
14,3	ΔP_c^*	0,013	0,023	0,032	0,038	0,044	0,048	0,052	0,055	0,058	0,061
	$P_{c\Delta}^*$	0,986	0,986	0,987	0,987	0,988	0,988	0,989	0,989	0,989	0,990
	p_{Δ}^*	0,973	0,963	0,955	0,949	0,944	0,940	0,937	0,934	0,931	0,929
	n^*, m^*	7,6	14,12	21,18	28,24	35,30	42,36	49,42	56,48	63,54	70,60
12,5	ΔP_c^*	0,010	0,019	0,026	0,032	0,036	0,040	0,044	0,047	0,050	0,052
	$P_{c\Delta}^*$	0,990	0,989	0,989	0,990	0,989	0,990	0,991	0,991	0,991	0,992
	p_{Δ}^*	0,980	0,970	0,963	0,958	0,953	0,950	0,947	0,944	0,942	0,940

	n^*, m^*	8,7	16,14	24,21	32,28	40,35	48,42	56,49	64,56	72,63	80,70
11,1	ΔP_C^*	0,007	0,015	0,022	0,027	0,031	0,035	0,038	0,041	0,043	0,045
	$P_{c\Delta}^*$	0,992	0,991	0,991	0,991	0,991	0,992	0,992	0,992	0,993	0,993
	p_Δ^*	0,985	0,976	0,969	0,964	0,960	0,957	0,954	0,952	0,950	0,948
	n^*, m^*	9,8	18,16	27,24	36,32	45,40	54,48	63,56	72,64	81,72	90,80
10	ΔP_C^*	0,006	0,013	0,019	0,023	0,027	0,030	0,033	0,036	0,038	0,040
	$P_{c\Delta}^*$	0,994	0,993	0,993	0,992	0,992	0,992	0,993	0,994	0,994	0,994
	p_Δ^*	0,988	0,980	0,974	0,969	0,965	0,962	0,960	0,958	0,956	0,954
	n^*, m^*	10,9	20,18	30,27	40,36	50,45	60,54	70,63	80,72	90,81	100,99

Таблица 3.2 Оптимальные значения комплексного линейного критерия ΔP_C^* и частных показателей $P_{c\Delta}^*$ и p_Δ^* для реализуемых допусков второго уровня и 9 обобщенных кратностей

dW_p %	Пара метры	Обобщенные кратности K_i								
		K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}
66,7	ΔP_C^*	-	0,391	0,410	0,427	0,441	0,453	0,463	0,471	0,479
	$P_{c\Delta}^*$	-	0,880	0,908	0,924	0,934	0,941	0,946	0,950	0,954
	p_Δ^*	-	0,489	0,498	0,497	0,493	0,488	0,483	0,479	0,475
	n^*, m^*	-	6,2	9,3	12,4	15,5	18,6	21,7	24,8	27,9

50	ΔP_c^*	0,224	0,245	0,267	0,284	0,297	0,308	0,317	0,325	0,331
	$P_{c\Delta}^*$	0,863	0,915	0,934	0,944	0,951	0,956	0,959	0,962	0,964
	p_Δ^*	0,639	0,670	0,667	0,660	0,654	0,648	0,642	0,637	0,633
	n^*, m^*	4,2	8,4	12,6	16,8	20,10	24,12	28,14	32,16	36,18
40	ΔP_c^*	0,147	0,173	0,194	0,209	0,221	0,231	0,239	0,246	0,252
	$P_{c\Delta}^*$	0,907	0,939	0,951	0,957	0,962	0,966	0,968	0,971	0,972
	p_Δ^*	0,760	0,766	0,757	0,748	0,741	0,735	0,729	0,725	0,720
	n^*, m^*	5,3	10,6	15,9	20,12	25,15	30,18	35,21	40,24	45,27
33,3	ΔP_c^*	0,104	0,131	0,150	0,164	0,175	0,183	0,191	0,197	0,202
	$P_{c\Delta}^*$	0,933	0,954	0,962	0,967	0,970	0,972	0,975	0,976	0,978
	p_Δ^*	0,829	0,823	0,812	0,803	0,795	0,789	0,784	0,779	0,776
	n^*, m^*	6,4	12,8	18,12	24,16	30,20	36,24	42,28	48,32	54,36
28,6	ΔP_c^*	0,079	0,104	0,121	0,134	0,144	0,151	0,158	0,163	0,168
	$P_{c\Delta}^*$	0,951	0,963	0,969	0,973	0,975	0,977	0,979	0,980	0,981
	p_Δ^*	0,872	0,859	0,848	0,839	0,832	0,826	0,821	0,817	0,813
	n^*, m^*	7,5	14,10	21,15	28,20	35,25	42,30	49,35	56,40	63,45
25	ΔP_c^*	0,062	0,085	0,101	0,112	0,121	0,128	0,134	0,139	0,143
	$P_{c\Delta}^*$	0,961	0,970	0,974	0,977	0,979	0,980	0,982	0,983	0,983

	p_{Δ}^*	0,899	0,885	0,873	0,865	0,858	0,852	0,848	0,844	0,840
	n^*, m^*	8,6	16,12	24,18	32,24	40,30	48,36	56,42	64,48	72,54
22,2	ΔP_c^*	0,050	0,072	0,086	0,097	0,105	0,111	0,116	0,121	0,126
	$P_{c\Delta}^*$	0,969	0,975	0,978	0,981	0,982	0,983	0,984	0,985	0,985
	p_{Δ}^*	0,919	0,903	0,892	0,884	0,877	0,872	0,868	0,864	0,861
	n^*, m^*	9,7	18,14	27,21	36,28	45,35	54,42	63,49	72,56	81,63
20	ΔP_c^*	0,042	0,062	0,075	0,084	0,092	0,098	0,103	0,107	0,110
	$P_{c\Delta}^*$	0,975	0,979	0,981	0,984	0,985	0,986	0,987	0,987	0,987
	p_{Δ}^*	0,933	0,917	0,906	0,899	0,893	0,888	0,884	0,880	0,877
	n^*, m^*	10,8	20,16	30,24	40,32	50,40	60,48	70,56	80,64	90,72
18,2	ΔP_c^*	0,035	0,054	0,066	0,075	0,082	0,087	0,092	0,096	0,099
	$P_{c\Delta}^*$	0,978	0,982	0,984	0,985	0,987	0,987	0,988	0,989	0,989
	p_{Δ}^*	0,943	0,928	0,918	0,910	0,905	0,900	0,896	0,893	0,891
	n^*, m^*	11,9	22,18	33,27	44,36	55,45	66,54	77,63	88,72	99,81

Для удобства использования таблиц при нахождении решений задач синтеза в них приведены, помимо значений величин ΔP_c^* , $P_{c\Delta}^*$ и p_{Δ}^* параметры структур резервирования n^*, m^* рассчитанные по формуле (1.8). Эти значения также можно получить по таблицам 1.2 и 1.3 главы 1, Например, для обобщенной кратности K_3 допуска 50% первого уровня таблицы 3.1 по таблице 1.2 для K_3 находим

индивидуальную кратность $6/3$, которая определяет структуру резервирования: $n = 6$ и $m = 3$. Аналогично, для обобщенной кратности K_4 допуска $66,7\%$ второго уровня по таблице 1.3 для K_4 находим индивидуальную кратность $9/3$, которая определяет структуру резервирования: $n = 9$ и $m = 3$ и т.д..

Величины n_m и m_m допусков первого уровня, приведенных в таблице 3.1, расположены в первой колонке, соответствующей обобщенной кратности K_1 а для допусков второго уровня, приведенных в таблице 3.2, величины n_m и m_m тоже расположены в первой колонке, соответствующей обобщенной кратности K_2 . Величины $n_m = 2$ и $m_m = 1$ допуска 50% таблицы 3.1, а также величины $n_m = 3$ и $m_m = 1$ допуска $66,7\%$ таблицы 3.2 соответствуют кратному резервированию. Поэтому параметры ΔP_C^* , $P_{C\Delta}^*$ и p_{Δ}^* для этих структур не приводятся.

Для иллюстрации результатов оптимизации, представленных в таблицах 3.1 и 3.2, на рисунках 3.7 – 3.12 показаны зависимости искомых оптимальных величин от обобщенной кратности K_i .

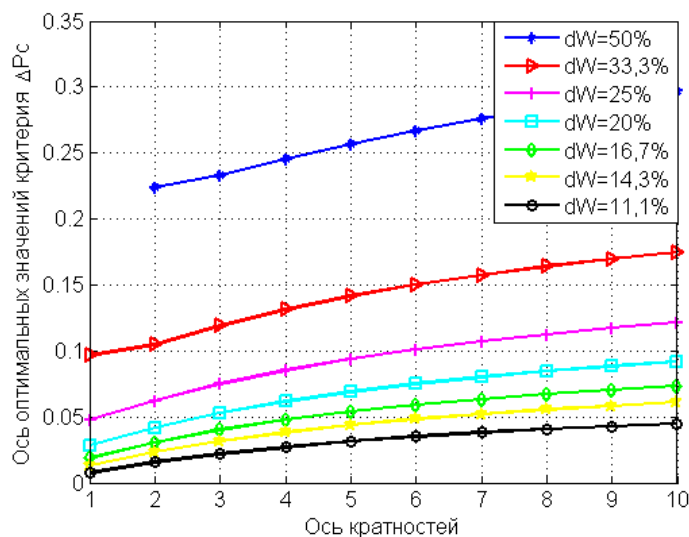


Рисунок 3.7. Графики зависимостей $\Delta P_C^*(K_i)$ для допусков 1-го уровня

Графики на рис. 3.7 показывают, что зависимости $\Delta P_C^*(K_i)$ для всех реализуемых допусков 1-го уровня эквидистантны и имеют монотонно возрастающий характер. При уменьшении реализуемых допусков монотонный

рост зависимостей $\Delta P_c^*(K_i)$ ослабляется. При любой кратности резервирования увеличение реализуемого допуска приводит к быстрому росту значений комплексного линейного критерия.

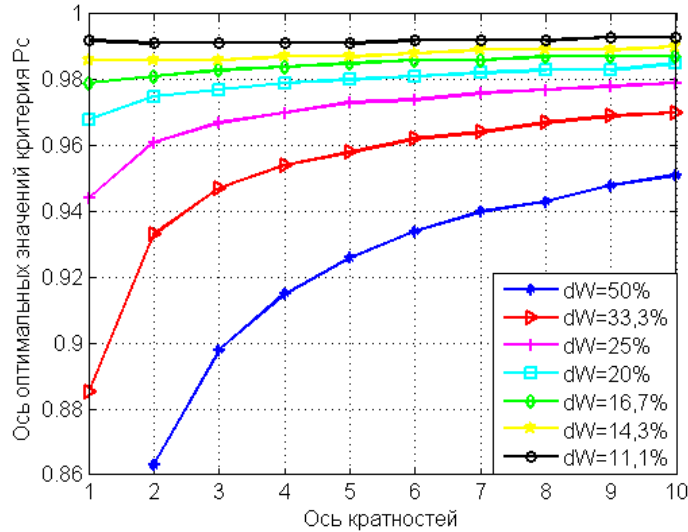


Рисунок 3.8. Графики зависимостей $P_{c\Delta}^*(K_i)$ для допусков 1-го уровня

Графики на рис. 3.8 показывают, что на зависимость $P_{c\Delta}^*(K_i)$ реализуемые допуски и кратность резервирования влияют в разной степени. Так, повышение оптимальных значений частного показателя безотказности $P_{c\Delta}^*$ за счет увеличения кратности резервирования можно обеспечить только для реализуемых допусков не менее 14,3%, так как в этом диапазоне зависимости $P_{c\Delta}^*(K_i)$ монотонно возрастают, а при меньших допусках зависимости $P_{c\Delta}^*(K_i)$ практически остаются постоянными. Повысить значения частного показателя безотказности $P_{c\Delta}^*$ в указанном диапазоне $dW_p < 14,3\%$ можно только уменьшением реализуемых допусков первого уровня.

Графики на рис. 3.9 показывают, что на зависимости $p_{\Delta}^*(K_i)$ водинаковой степени сильно влияют и величины кратностей резервирования, и величины

реализуемых допусков первого уровня. Причем, при реализуемых допусках не менее 25% зависимости $p_{\Delta}^*(K_i)$ имеют не монотонный характер (сначала возрастают, а затем убывают). При реализуемых допусках менее 25% зависимости $p_{\Delta}^*(K_i)$ приобретают монотонно убывающий характер, обеспечивая возможность снижения требований к безотказности элементов пассивно резервированных подсистем ЛА.

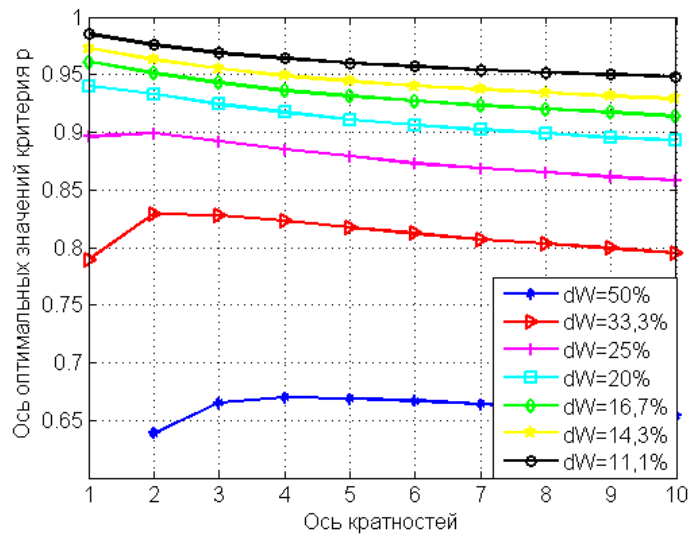


Рисунок 3.9. Графики зависимостей $p_{\Delta}^*(K_i)$ для допусков 1-го уровня

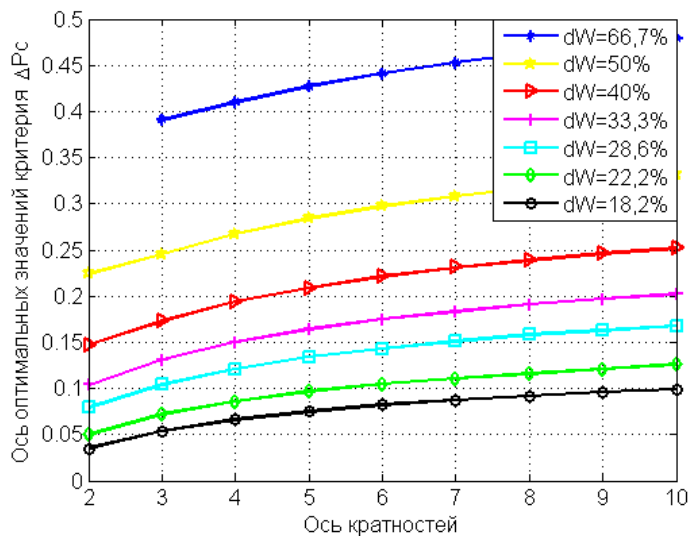


Рисунок 3.10. Графики зависимостей $\Delta P_C^*(K_i)$ для допусков 2-го уровня

Графики 3.10 зависимостей $\Delta P_C^*(K_i)$ для допусков 2-го уровня аналогичны допускам первого уровня и отражают те же свойства.

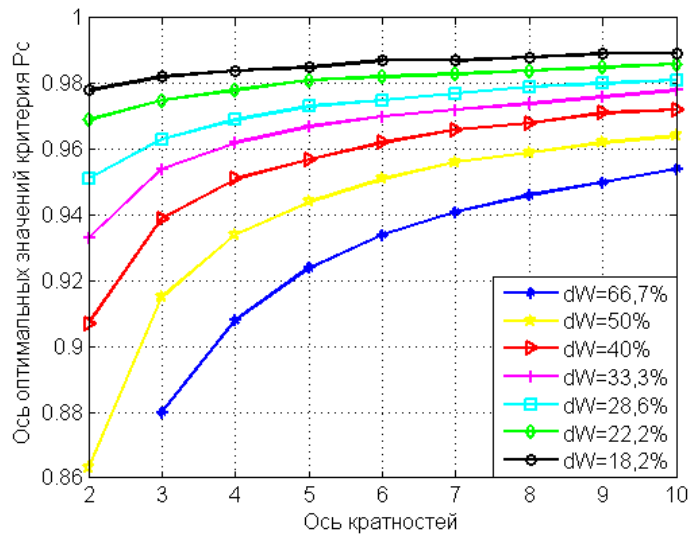


Рисунок 3.11 Графики зависимостей $P_{C\Delta}^*(K_i)$ для допусков 2-го уровня

Графики 3.11 зависимостей $P_{C\Delta}^*(K_i)$ имеют монотонно возрастающий характер при любых используемых реализуемых допусках второго уровня.

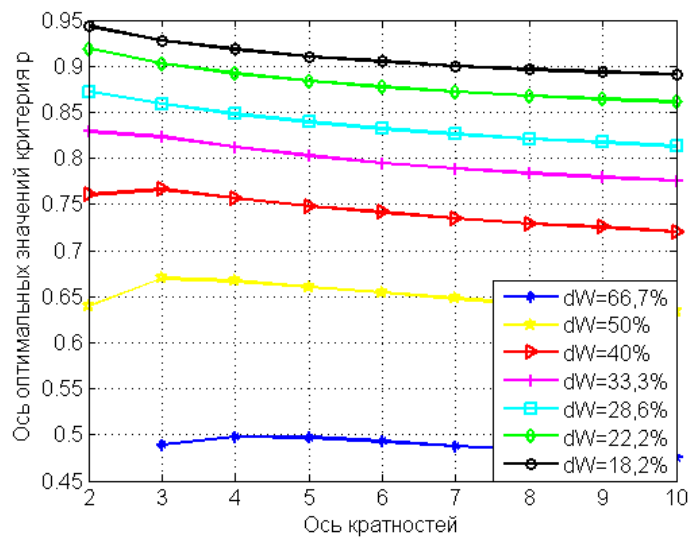


Рисунок 3.12. Графики зависимостей $P_{\Delta}^*(K_i)$ для допусков 2-го уровня

Графики на рис. 3.12 показывают, что на зависимости $p_{\Delta}^*(K_i)$ одинаковой степени сильно влияют и величины кратностей резервирования, и величины реализуемых допусков второго уровня. Причем, при реализуемых допусках не менее 40% зависимости $p_{\Delta}^*(K_i)$ имеют не монотонный характер (сначала возрастают, а затем убывают). При реализуемых допусках менее 40% зависимости $p_{\Delta}^*(K_i)$ приобретают монотонно убывающий характер, обеспечивая возможность снижения требований к безотказности элементов пассивно резервированных подсистем ЛА.

В целом графики на рис. 3.10 – 3.12 показывают, что характер зависимостей $\Delta P_c^* = \Delta P_c^*(K_i^и)$, $P_{c\Delta}^* = P_{c\Delta}^*(K_i^и)$, $p_{\Delta}^* = p_{\Delta}^*(K_i^и)$, для допусков второго уровня аналогичен характеру этих зависимостей для допусков первого уровня. Однако диапазоны изменения одноименных показателей для допусков первого и второго уровней существенно отличаются. Так комплексный линейный критерий для допусков первого уровня изменяется в диапазоне от 0 до 0,3, а для допусков второго уровня от 0,3 до 0,5. Аналогичная ситуация имеет место и для других показателей.

Это объясняется тем, что линейки (шкалы) возрастающих индивидуальных кратностей допусков 1-го и 2-го уровней, как отмечалось в конце подраздела 1.2 и 1.3 имеют разный характер и, поэтому, плохо сочетаются друг с другом.

Используя данные таблиц 3.1 и 3.2, составим сводную таблицу 3.3, позволяющую получать решение задачи синтеза подсистем ЛА по первому критерию для семи значений требуемой безотказности и используемой в работе сетки допусков 1-го и 2-го уровней.

Таблица 3.3 Оптимальные характеристики обеспечения требуемого уровня безотказности подсистем ЛА

$P_{\text{тр}}$	Харак-тики	Значения характеристик обеспечения $P_{\text{тр}}$					
	Обеспечения						
	$P_{\text{тр}}^*$						
0,93	$P_{c\Delta}^*$	0,934	0,934	0,939	0,933	-	-
	$dW_p(\%)$	66,7	50	40	33,3	-	-
	K_i^*	K_6	K_6^1, K_4^2	K_3	$K_2^{1,2}$	-	-
	p_{Δ}^*	0,493	0,667	0,766	0,829		
	n^*, m^*	15,5	12,6	10,6	6,4	-	-
0,94	$P_{c\Delta}^*$	0,941	0,944	0,944	-	-	-
	$dW_p(\%)$	66,7	50	25	-	-	-
	K_i^*	K_7	K_8^1, K_5^2	K_1^1	-	-	-
	p_{Δ}^*	0,488	0,660	0,896			
	n^*, m^*	18,6	16,8	4,3	-	-	-

0,95	$P_{c\Delta}^*$	0,950	0,951	0,951	0,954	0,951	-
	$dW_p(\%)$	66,7	50	40	33,3	28,6	-
	K_i^*	K_9	K_{10}^1, K_6^2	K_4	K_4^1, K_3^2	K_2	-
	p_Δ^*	0,479	0,654	0,757	0,823	0,872	
	n^*, m^*	24,8	20,10	15,9	12,8	7,5	-
0,96	$P_{c\Delta}^*$	0,962	0,962	0,962	0,963	0,961	0,968
	$dW_p(\%)$	50	40	33,3	28,6	25	20
	K_i^*	K_9^2	K_6	K_6^1, K_4^2	K_3	$K_2^{1,2}$	K_1^1
	p_Δ^*	0,637	0,741	0,812	0,859	0,899	0,940
	n^*, m^*	32,16	25,15	18,12	14,10	8,6	5,4
0,97	$P_{c\Delta}^*$	0,971	0,970	0,973	0,970	0,975	0,979
	$dW_p(\%)$	40	33,3	28,6	25	20	16,7
	K_i^*	K_9	K_6^2	K_5	K_4^1, K_3^2	$K_2^{1,2}$	K_1
	p_Δ^*	0,725	0,795	0,839	0,885	0,933	0,961

	n^*, m^*	40,24	30,20	28,20	16,12	10,8	6,5
0,98	$P_{c\Delta}^*$	0,980	0,980	0,981	0,981	0,982	0,981
	$dW_p(\%)$	28,6	25	22,2	20	18,2	16,7
	K_i^*	K_9	K_7^2	K_5	K_6^1, K_4^2	K_3	K_2
	p_Δ^*	0,817	0,852	0,884	0,906	0,928	0,951
	n^*, m^*	56,40	48,36	36,28	30,24	22,18	12,10
0,99	$P_{c\Delta}^*$	0,990	0,990	0,991	-	-	-
	$dW_p(\%)$	14,3	12,5	11,1	-	-	-
	K_i^*	K_{10}	K_6	K_3	-	-	-
	p_Δ^*	0,929	0,950	0,969			
	n^*, m^*	70,60	48,42	27,24	-	-	-

Таблица 3.3 формируется следующим образом. Для требуемой безотказности 0,93 этой таблицы в таблицах 3.1 и 3.2 отыскиваются оптимальные значения интересующего показателя $P_{c\Delta}^*$ в диапазоне $0,93 \leq P_{c\Delta}^* < 0,94$ и выписываются удовлетворяющие этому диапазону величины допусков и обобщенных кратностей резервирования. Аналогично, для требуемой

безотказности 0,94 (таблицы 3.3) в таблицах 3.1 и 3.2 отыскиваются оптимальные значения интересующего показателя в диапазоне $0,94 \leq P_{c\Delta}^* < 0,95$ и выписываются удовлетворяющие этому диапазону соответствующие величины допусков и обобщенных кратностей резервирования и т.д.

В результате заполнения таблицы 3.3 оптимальные обобщенные кратности помимо нижних индексов могут иметь верхние индексы. Верхний индекс 1 указывает на то, что данная кратность относится к допуску первого уровня, а 2 – к допуску второго уровня. Наличие двух кратностей в одной клетке таблицы говорит о том, что соответствующая оптимальная структура резервирования может быть реализована двумя разными оптимальными обобщенными кратностями двух одинаковых допусков, но разного уровня, обеспечивающих одну и ту же оптимальную индивидуальную кратность резервирования. Например, требуемая безотказность $P_{тр} = 0,93$ может быть реализована допуском $dW_p = 50\%$ первого уровня и оптимальной обобщенной кратностью K_6 , а также допуском $dW_p = 50\%$ второго уровня и оптимальной обобщенной кратностью K_4 , причем оптимальные индивидуальные кратности в обоих случаях совпадают и определяют оптимальную структуру резервирования с параметрами: $n^* = 12$, $m^* = 6$. Достижимая при этой структуре оптимальная безотказность резервированной подсистемы $P_{c\Delta}^* = 0,934 > P_{тр} = 0,93$.

Кроме того, в одной клетке таблицы могут находиться оптимальные обобщенные кратности с двумя верхними индексами. Эти верхние индексы означают, что данная кратность реализуется соответствующим допуском одного номинала, но двух разных уровней. Например, требуемая безотказность $P_{тр} = 0,97$ может обеспечиваться реализуемым допуском 20% с оптимальной обобщенной кратностью $K_2^{1,2}$. Это означает, что оптимальная индивидуальная кратность $K_2^1 = 10/8$ реализуемого допуска 20% первого уровня и оптимальная индивидуальная кратность $K_2^2 = 10/8$ реализуемого допуска 20% второго уровня обеспечивают

одинаковую оптимальную безотказность резервированной подсистемы $P_{c\Delta}^* = 0,975 > P_{тр} = 0,970$.

При оптимизации по комплексному относительному критерию для каждого значения $P_{тр}$ у многих допусков существует несколько оптимальных структур, соответствующих разным оптимальным кратностям резервирования. Например, требуемую безотказность подсистемы $P_{тр} = 0,94$ обеспечивает допуск 50% первого уровня: с оптимальной обобщенной кратностью K_7 (индивидуальной кратностью $K_7^и = 14/7$, $n^* = 14$, $m^* = 7$), при $P_{cd}^* = 0,940 = P_{тр} = 0,94$; с оптимальной обобщенной кратностью K_8 (индивидуальной кратностью $K_8^и = 16/8$, $n^* = 16$, $m^* = 8$), при $P_{cd}^* = 0,944 > 0,94$; с оптимальной обобщенной кратностью K_9 (индивидуальной кратностью $K_9^и = 18/9$, $n^* = 18$, $m^* = 9$), при $P_{cd}^* = 0,948 > 0,94$. Аналогично, требуемую безотказность подсистемы $P_{тр} = 0,95$ обеспечивает допуск 33,3% первого уровня: с оптимальной обобщенной кратностью K_4 (индивидуальной кратностью $K_4^и = 12/8$, $n^* = 12$, $m^* = 8$), при $P_{cd}^* = 0,954 > 0,950$; с оптимальной обобщенной кратностью K_5 (индивидуальной кратностью $K_5^и = 15/10$, $n^* = 15$, $m^* = 10$), при $P_{cd}^* = 0,958 > 0,950$ и т.д. Поэтому, в таблице 3.3 для каждого обеспечивающего требуемую безотказность допуска представлены наиболее простые оптимальные структуры резервирования, соответствующие минимально возможным оптимальным кратностям резервирования.

Сводная таблица 3.3 позволяет найти оптимальные структуры резервирования для заданной сетки требуемых безотказностей и реализуемых допусков 1-го и 2-го уровней по линейному критерию. Например, требуемая безотказность резервированной подсистемы, равная 0,95 может быть обеспечена: при реализуемом допуске 66,7% структурой $n^* = 24$, $m^* = 8$, при реализуемом допуске 50% структурой $n^* = 20$, $m^* = 10$; при реализуемом допуске 40% структурой $n^* = 15$, $m^* = 9$; при реализуемом допуске 33,3% структурой $n^* = 12$, m^*

= 8; при реализуемом допуске 28,6% структурой $n^* = 7$, $m^* = 5$. Выбор остается за разработчиком.

При проектировании подсистем с требуемой безотказностью 0,95 оптимальные структуры резервирования можно обеспечить указанными реализуемыми допусками в диапазоне от 28,6% до 66,6%, который получен в рамках диссертационного исследования вне этого диапазона допусков выполнить требование по безотказности, равное 0,95 подсистем ЛА можно только не оптимальными структурами резервирования. Аналогично, по таблице 3.3 находятся оптимальные структуры резервирования для других значений требуемой безотказности резервированной подсистемы ЛА. Сводная таблица 3.3 представляет достаточно широкие возможности разработчику для выбора оптимальной структуры резервирования проектируемой подсистемы, удовлетворяющей предъявляемым к ней требованиям по безотказности и назначенному допуску на изменение ее выходного параметра.

Таким образом, каждая вторая строка таблицы 3.3 при каждой величине $P_{тр}$ задает ограниченные диапазоны дискретных значений реализуемых допусков. Выбор реализуемого допуска в пределах этих диапазонов обеспечивает выполнение соответствующих требований по безотказности оптимальными структурами резервирования. Для расширения указанных диапазонов и уплотнения сетки реализуемых допусков необходимо повышать их уровень (применять допуски третьего и последующих уровней), уменьшать вплоть до нуля допуски в каждом уровне, а так же удлинять линейки возрастающих индивидуальных кратностей.

Для наглядного представления результатов, представленных в таблице 3.3, на рисунке 3.13 и 3.14 показаны зависимости оптимальных численностей элементов n^* и m^* , входящих в оптимальную структуру от значений реализуемых допусков для различных величин требуемой безотказности резервированных подсистем ЛА.

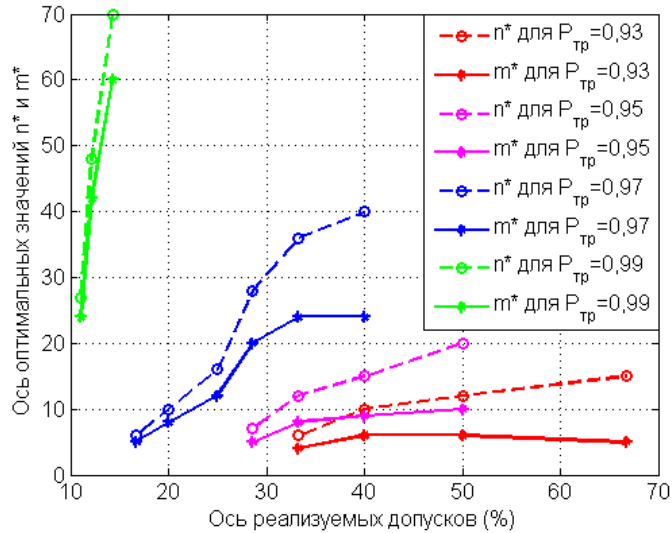


Рисунок 3.13 Графики зависимостей n^* , m^* от значений реализуемых допусков для требуемых величин безотказностей $P_{тр} = 0,93; 0,95; 0,97; 0,99$

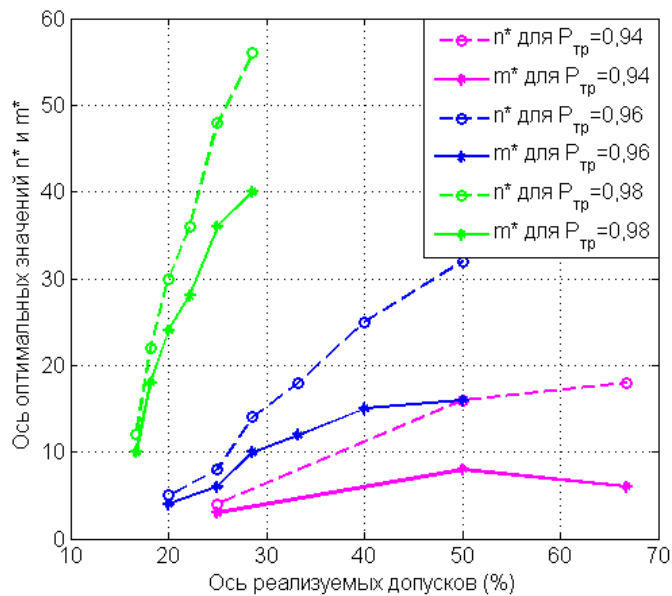


Рисунок 3.14 Графики зависимостей n^* , m^* от значений реализуемых допусков для требуемых величин безотказностей $P_{тр} = 0,94; 0,96; 0,98$

Анализ представленных в таблицах и графиках результатов позволяет установить следующие закономерности:

1. Оптимальные значения комплексного критерия $\Delta P_c^* = P_{c\Delta}^* - p_{\Delta}^*$ при любых рассмотренных значениях реализуемых допусков монотонно возрастают с

ростом индивидуальной кратности резервирования $K_i^И$ и при любом значении индивидуальной кратности резервирования $K_i^И$ монотонно убывают с уменьшением реализуемых допусков.

2. Оптимальные значения частного показателя p_{Δ}^* , определяющего безотказность элементов, монотонно убывают с ростом индивидуальной кратности резервирования $K_i^И$ (снижая требования к безотказности элементов пассивно резервированных подсистем ЛА) при реализуемых допусках 1-го уровня, меньших 25%, и второго уровня, меньших 40%, а при допусках, не меньше указанных значений, сначала возрастают, а затем монотонно убывают.

3. Оптимальные значения безотказности резервированных подсистем $P_{c\Delta}^*$ можно увеличить в интересах удовлетворения техническим требованиям либо уменьшением реализуемых допусков при любой индивидуальной кратности резервирования $K_i^И$, либо увеличением индивидуальной кратности резервирования $K_i^И$ при реализуемом допуске, не менее 14,3%, либо, наконец, соответствующим изменением обоих указанных параметров в указанных диапазонах.

4. Оптимальные значения безотказности резервированных подсистем $P_{c\Delta}^*$ монотонно возрастают с увеличением индивидуальной кратности резервирования $K_i^И$, для реализуемых допусков любого уровня не менее 14,3%, а для реализуемых допусков менее 14,3% показатель $P_{c\Delta}^*$ с увеличением кратности резервирования практически не меняется, сохраняя значения в окрестностях 0,99.

5. При допусках более 25% и высоких требованиях к безотказности резервированных подсистем (более 0,98) решение задачи синтеза может быть получено только при больших кратностях резервирования, когда оптимальная численность элементов резервированной подсистемы n^* выше 100, а при допусках

менее 25% и тех же высоких требованиях к безотказности подсистем оптимальная индивидуальная кратность резервирования K_i^* резко уменьшается, обеспечивая решение задачи синтеза при численности n^* и m^* не выше 20- 30.

6. При реализуемых допусках, выбираемых в рамках диапазонов, задаваемых таблицей 3.3, требования по безотказности обеспечиваются оптимальными структурами резервирования, в то время как вне этих диапазонов реализуемых допусков требования по безотказности можно обеспечить только не оптимальными структурами резервирования. Расширить диапазоны реализуемых допусков, обеспечивающих решение задачи синтеза можно увеличением уровней допусков, уменьшением допусков в каждом уровне и удлинением линейки возрастающих индивидуальных кратностей в каждом допуске.

3.5 Решение задачи синтеза по комплексному относительному критерию

Проведем расчеты, аналогичные предыдущему, для решения задачи синтеза по комплексному относительному критерию. В таблице 3.4 представлены результаты расчетов оптимальных значений комплексного относительного критерия dP_c^* и соответствующие ему частные показатели P_{cd}^* , P_d^* для десяти кратностей и используемых в работе допусков первого уровня, а в таблице 3.5 – аналогичные результаты для девяти кратностей и используемых допусков второго уровня. Данные результаты вычислены с точностью 0,0001 и округлены до 3-х знаков.

Таблица 3.4 Оптимальные значения комплексного относительного критерия dP_c^ и частных показателей P_{cd}^* и P_d^* для реализуемых допусков первого уровня и 10 обобщенных кратностей*

dW_p	Пара	Обобщенные кратности K_i
--------	------	----------------------------

%	метры	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}
50	dP_c^*	-	0,380	0,368	0,380	0,396	0,412	0,427	0,440	0,453	0,465
	P_{cd}^*	-	0,742	0,824	0,857	0,877	0,889	0,899	0,906	0,911	0,917
	p_d^*	-	0,538	0,602	0,621	0,628	0,630	0,630	0,629	0,627	0,626
	n^*, m^*	-	4,2	6,3	8,4	10,5	12,6	14,7	16,8	18,9	20,10
33,3	dP_c^*	0,125	0,127	0,145	0,161	0,174	0,186	0,196	0,205	0,214	0,221
	P_{cd}^*	0,844	0,916	0,933	0,941	0,948	0,951	0,955	0,957	0,959	0,961
	p_d^*	0,750	0,813	0,815	0,811	0,807	0,802	0,798	0,794	0,790	0,787
	n^*, m^*	3,2	6,4	9,6	12,8	15,10	18,12	21,14	24,16	27,18	30,20
25	dP_c^*	0,054	0,069	0,084	0,097	0,107	0,116	0,124	0,130	0,136	0,142
	P_{cd}^*	0,937	0,957	0,963	0,966	0,969	0,970	0,972	0,973	0,974	0,975
	p_d^*	0,889	0,895	0,888	0,881	0,875	0,869	0,865	0,861	0,857	0,854
	n^*, m^*	4,3	8,6	12,9	16,12	20,15	24,18	28,21	32,24	36,27	40,30
20	dP_c^*	0,030	0,045	0,057	0,068	0,076	0,083	0,089	0,094	0,099	0,103
	P_{cd}^*	0,965	0,973	0,975	0,977	0,978	0,979	0,980	0,982	0,982	0,983
	p_d^*	0,937	0,931	0,922	0,915	0,909	0,904	0,900	0,897	0,893	0,891
	n^*, m^*	5,4	10,8	15,12	20,16	25,20	30,24	35,28	40,32	45,36	50,40
16,7	dP_c^*	0,019	0,032	0,043	0,051	0,058	0,064	0,069	0,073	0,077	0,080
	P_{cd}^*	0,978	0,980	0,982	0,983	0,984	0,984	0,985	0,985	0,986	0,986

	P_d^*	0,960	0,950	0,942	0,935	0,930	0,925	0,922	0,918	0,916	0,913
	n^*, m^*	6,5	12,10	18,15	24,20	30,25	36,30	42,35	48,40	54,45	60,50
14,3	dP_c^*	0,013	0,024	0,033	0,040	0,046	0,051	0,056	0,059	0,063	0,066
	P_{cd}^*	0,985	0,985	0,986	0,986	0,987	0,987	0,988	0,988	0,989	0,989
	P_d^*	0,972	0,962	0,954	0,948	0,943	0,939	0,936	0,933	0,931	0,928
	n^*, m^*	7,6	14,12	21,18	28,24	35,30	42,36	49,42	56,48	63,54	70,60
12,5	dP_c^*	0,010	0,019	0,027	0,033	0,038	0,043	0,046	0,050	0,053	0,055
	P_{cd}^*	0,990	0,989	0,989	0,989	0,990	0,990	0,990	0,991	0,991	0,991
	P_d^*	0,980	0,970	0,963	0,957	0,953	0,949	0,946	0,944	0,941	0,939
	n^*, m^*	8,7	16,14	24,21	32,28	40,35	48,42	56,49	64,56	72,63	80,70
11,1	dP_c^*	0,008	0,016	0,023	0,028	0,033	0,036	0,040	0,043	0,045	0,047
	P_{cd}^*	0,991	0,990	0,991	0,991	0,991	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992
	P_d^*	0,984	0,975	0,969	0,964	0,960	0,957	0,954	0,951	0,949	0,947
	n^*, m^*	9,8	18,16	27,24	36,32	45,40	54,48	63,56	72,64	81,72	90,80
10	dP_c^*	0,006	0,013	0,019	0,024	0,028	0,032	0,035	0,037	0,040	0,042
	P_{cd}^*	0,994	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,993	0,993	0,993	0,994
	P_d^*	0,988	0,979	0,973	0,969	0,965	0,962	0,960	0,957	0,955	0,954
	n^*, m^*	10,9	20,18	30,27	40,36	50,45	60,54	70,63	80,72	90,81	100,90

Таблица 3.5 Оптимальные значения комплексного относительного критерия dP_c^* и частных показателей P_c^* и p^* для реализуемых допусков второго уровня и 9 обобщенных кратностей

dW_p %	Пара метры	Обобщенные кратности K_i								
		K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}
66,7	dP_c^*	-	0,947	0,921	0,940	0,967	0,994	1,020	1,043	1,065
	P_{cd}^*	-	0,658	0,761	0,805	0,832	0,850	0,862	0,875	0,882
	p_d^*	-	0,338	0,396	0,415	0,423	0,426	0,427	0,428	0,427
	n^*, m^*	-	6,2	9,3	12,4	15,5	18,6	21,7	24,8	27,9
50	dP_c^*	0,379	0,380	0,412	0,440	0,464	0,485	0,503	0,519	0,533
	P_{cd}^*	0,742	0,857	0,889	0,906	0,917	0,924	0,93	0,934	0,938
	p_d^*	0,538	0,621	0,63	0,629	0,626	0,622	0,619	0,615	0,612
	n^*, m^*	4,2	8,4	12,6	16,8	20,10	24,12	28,14	32,16	36,18
40	dP_c^*	0,198	0,229	0,259	0,282	0,301	0,317	0,330	0,342	0,352
	P_{cd}^*	0,867	0,915	0,930	0,940	0,946	0,951	0,954	0,957	0,959
	p_d^*	0,724	0,744	0,739	0,733	0,727	0,722	0,717	0,713	0,709
	n^*, m^*	5,3	10,6	15,9	20,12	25,15	30,18	35,21	40,24	45,27

33,3	dP_c^*	0,127	0,160	0,186	0,205	0,221	0,233	0,244	0,253	0,262
	P_{cd}^*	0,916	0,941	0,951	0,957	0,961	0,963	0,966	0,968	0,970
	P_d^*	0,813	0,811	0,802	0,794	0,787	0,781	0,776	0,772	0,769
	n^*, m^*	6,4	12,8	18,12	24,16	30,20	36,24	42,28	48,32	54,36
28,6	dP_c^*	0,091	0,122	0,144	0,160	0,173	0,184	0,193	0,200	0,207
	P_{cd}^*	0,941	0,957	0,963	0,966	0,969	0,972	0,973	0,975	0,977
	P_d^*	0,863	0,853	0,842	0,833	0,826	0,821	0,816	0,812	0,809
	n^*, m^*	7,5	14,10	21,15	28,20	35,25	42,30	49,35	56,40	63,45
25	dP_c^*	0,069	0,097	0,116	0,13	0,142	0,151	0,159	0,165	0,171
	P_{cd}^*	0,957	0,966	0,970	0,973	0,975	0,977	0,978	0,98	0,98
	P_d^*	0,895	0,881	0,869	0,861	0,854	0,849	0,844	0,841	0,837
	n^*, m^*	8,6	16,12	24,18	32,24	40,30	48,36	56,42	64,48	72,54
22,2	dP_c^*	0,055	0,080	0,097	0,110	0,120	0,128	0,134	0,140	0,145
	P_{cd}^*	0,966	0,972	0,975	0,978	0,980	0,981	0,981	0,983	0,984
	P_d^*	0,916	0,900	0,889	0,881	0,875	0,870	0,865	0,862	0,859
	n^*, m^*	9,7	18,14	27,21	36,28	45,35	54,42	63,49	72,56	81,63

20	dP_c^*	0,045	0,067	0,083	0,094	0,103	0,110	0,116	0,122	0,126
	P_{cd}^*	0,973	0,977	0,979	0,981	0,983	0,984	0,985	0,985	0,985
	P_d^*	0,931	0,915	0,904	0,897	0,891	0,886	0,882	0,878	0,875
	n^*, m^*	10,8	20,16	30,24	40,32	50,40	60,48	70,56	80,64	90,72
18,2	dP_c^*	0,038	0,058	0,072	0,082	0,090	0,097	0,102	0,107	0,111
	P_{cd}^*	0,977	0,980	0,982	0,984	0,985	0,985	0,987	0,986	0,988
	P_d^*	0,942	0,926	0,916	0,909	0,903	0,898	0,895	0,891	0,889
	n^*, m^*	11,9	22,18	33,27	44,36	55,45	66,54	77,63	88,72	99,81

Минимальные величины n_m и m_m допусков первого уровня, приведенных в таблице 3.4, расположены в первой колонке, соответствующей обобщенной кратности K_1 а для допусков второго уровня, приведенных в таблице 3.5, величины n_m и m_m расположены в первой колонке, соответствующей обобщенной кратности K_2 . Величины $n_m = 2$ и $m_m = 1$ допуска 50% таблицы 3.4, а также величины $n_m = 3$ и $m_m = 1$ допуска 66,7% таблицы 3.5 соответствуют кратному резервированию.

Для иллюстрации результатов оптимизации, представленных в таблицах 3.4 и 3.5, на рисунках 3.15 – 3.20 показаны зависимости искомым оптимальных величин от обобщенной кратности K_i для допусков первого и второго уровней.

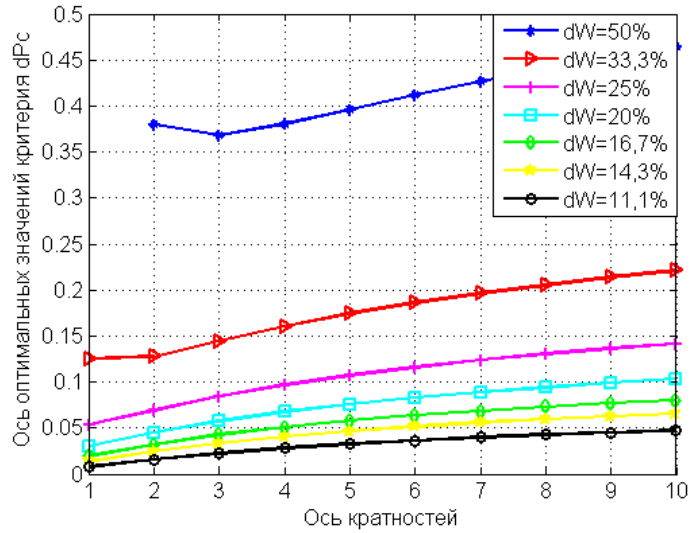


Рисунок 3.15 Графики зависимостей $dP_c^*(K_i)$ для допусков 1-го уровня

Графики на рис. 3.15 показывают, что зависимости $dP_c^*(K_i)$ для допусков первого уровня носят монотонно возрастающий характер, за исключением допусков 33,3% и 50% для которых эти зависимости возрастают не монотонно.

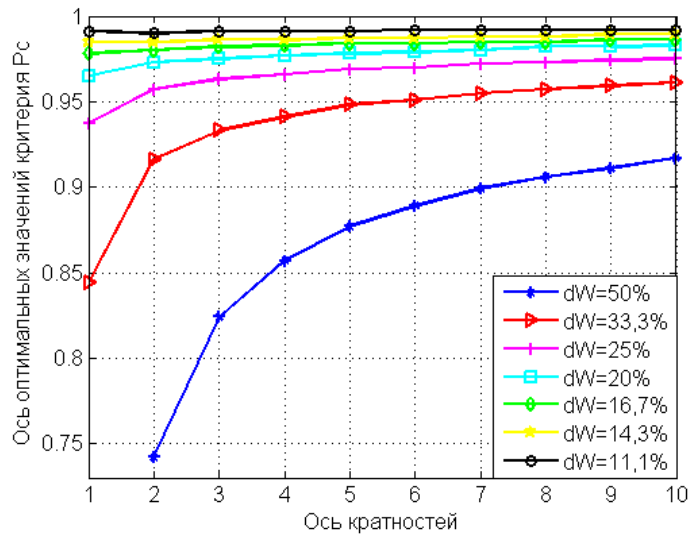


Рисунок 3.16 Графики зависимостей $P_{cd}^*(K_i)$ для допусков 1-го уровня

Графики на рис. 3.16 показывают, что зависимости $P_{cd}^*(K_i)$ для допусков первого уровня не менее 14,3% носят монотонно возрастающий характер, позволяя обеспечить требования по безотказности пассивно резервированных подсистем за счет увеличения кратности резервирования, а при допусках менее

14,3% сохраняют постоянное значение. При $dW_p < 14,3\%$ требования по безотказности можно удовлетворить только уменьшением реализуемых допусков.

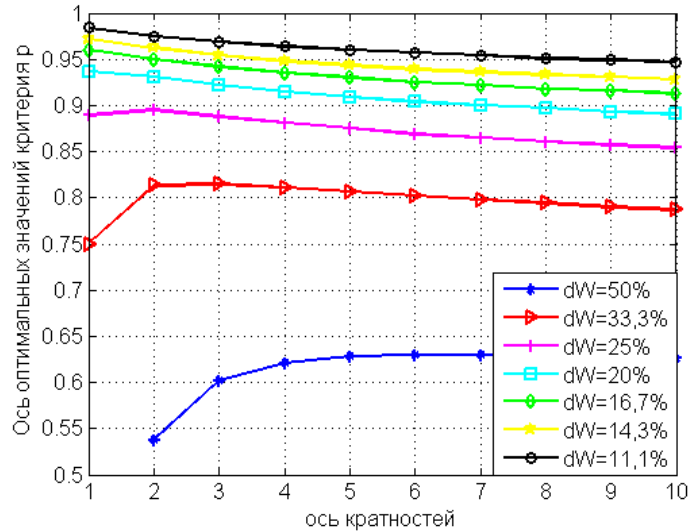


Рисунок 3.17 Графики зависимостей $p_d^*(K_i)$ для допусков 1-го уровня

Графики на рис. 3.17 показывают, что зависимости $p_d^*(K_i)$ для допусков первого уровня менее 25% носят монотонно убывающий характер, обеспечивая возможность снижения требований по безотказности к элементам пассивно резервированных подсистем, а при допусках не менее 25% имеют не монотонный характер (сначала возрастают, а затем убывают).

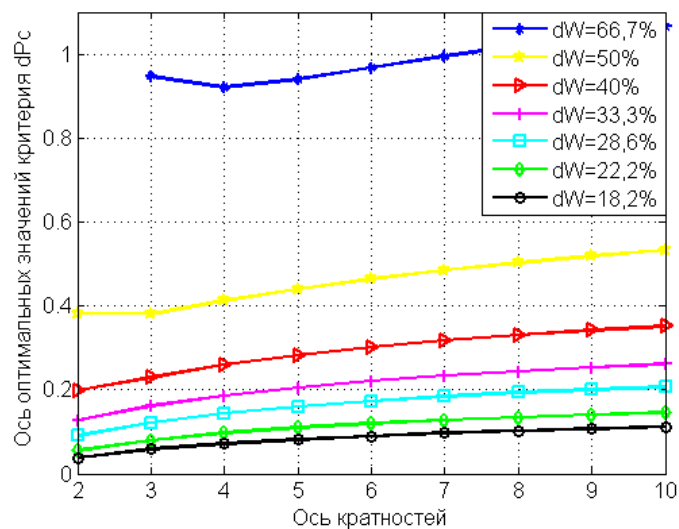


Рисунок 3.18 Графики зависимостей $dP_c^*(K_i)$ для допусков 2-го уровня

Графики на рис. 3.18 показывают, что зависимости $dP_c^*(K_i)$ для допусков второго уровня носят монотонно возрастающий характер, за исключением допусков 50% и 66,7% для которых эти зависимости возрастают не монотонно.

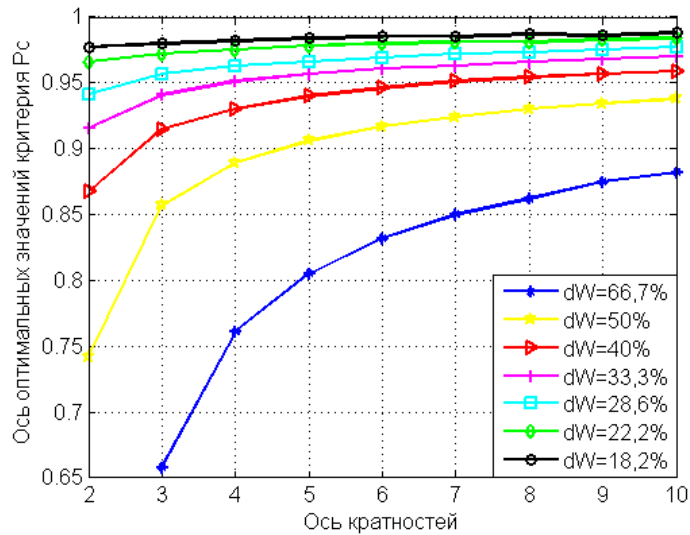


Рисунок 3.19 Графики зависимостей $P_{cd}^*(K_i)$ для допусков 2-го уровня

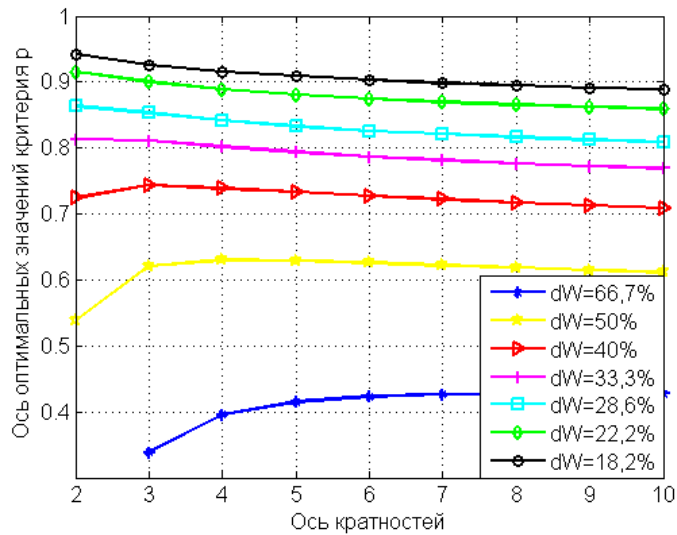


Рисунок 3.20 Графики зависимостей $p_d^*(K_i)$ для допусков 2-го уровня

Графики на рис. 3.19 показывают, что зависимости $P_{cd}^*(K_i)$ для всех исследованных допусков второго уровня носят монотонно возрастающий характер. При любой кратности резервирования с уменьшением реализуемых

допусков оптимальная безотказность пассивно резервированной подсистемы так же возрастает. Поэтому, при синтезе структуры по комплексному относительному критерию требование по безотказности к пассивно резервированной подсистеме можно удовлетворить, как повышением кратности резервирования, так и уменьшением реализуемых допусков второго уровня.

Графики на рис. 3.20 показывают, что зависимости $p_d^*(K_i)$ для допусков второго уровня менее 40% носят монотонно убывающий характер, позволяя снизить требования по безотказности к элементам пассивно резервированных подсистем, а при допусках не менее 40% имеют не монотонный характер (сначала возрастают, а затем убывают).

Используя данные таблиц 3.4 и 3.5, составим сводную таблицу 3.6, позволяющую получать решение задачи синтеза подсистем ЛА по комплексному относительному критерию для семи значений требуемой безотказности и используемой в работе сетки реализуемых допусков 1-го и 2-го уровней.

Таблица 3.6 Оптимальные характеристики обеспечения требуемого уровня безотказности подсистем ЛА

$P_{тр}$	Харак-тики Обеспечения	Значения характеристик обеспечения $P_{тр}$					
	$P_{тр}^*$						
0,93	P_{cd}^*	0,930	0,930	0,933	0,937	-	-
	$dW_p\%$	50	40	33,3	25	-	-
	K_i^*	K_8^2	K_4	K_3^1	K_1	-	-
	p_d^*	0,619	0,739	0,815	0,889	-	-
	n^*, m^*	28,14	15,9	9,6	4,3	-	-
0,94	P_{cd}^*	0,940	0,941	0,941	-	-	-

	$dW_p\%$	40	33,3	28,6	-	-	-
	K_i^*	K_5	K_4^1, K_3^2	K_2	-	-	-
	p_d^*	0,733	0,811	0,863	-	-	-
	n^*, m^*	20,12	12,8	7,5	-	-	-
0,95	P_{cd}^*	0,951	0,951	0,957	0,957	-	-
	$dW_p\%$	40	33,3	28,6	25	-	-
	K_i^*	K_7	K_6^1, K_4^2	K_3	K_2^1, K_2^2	-	-
	p_d^*	0,722	0,802	0,853	0,895	-	-
	n^*, m^*	30,18	18,12	14,10	8,6	-	-
0,96	P_{cd}^*	0,961	0,963	0,963	0,966	0,965	-
	$dW_p\%$	33,3	28,6	25	22,2	20	-
	K_i^*	K_{10}^1, K_6^2	K_4	K_3^1	K_2	K_1^1	-
	p_d^*	0,787	0,842	0,888	0,916	0,937	-
	n^*, m^*	30,20	21,15	12,9	9,7	5,4	-
0,97	P_{cd}^*	0,970	0,972	0,970	0,972	0,973	0,978
	$dW_p\%$	33,3	28,6	25	22,2	20	16,7
	K_i^*	K_{10}^2	K_7	K_6^1, K_4^2	K_3	K_2^1, K_2^2	K_1
	p_d^*	0,769	0,821	0,869	0,900	0,931	0,960
	n^*, m^*	54,36	42,30	24,18	18,14	10,8	6,5
0,98	P_{cd}^*	0,980	0,980	0,980	0,980	0,980	0,985
	$dW_p\%$	25	22,2	20	18,2	16,7	14,3

	K_i^*	K_9^2	K_6	K_7	K_3	K_2	K_1
	p_d^*	0,841	0,875	0,900	0,926	0,950	0,972
	n^*, m^*	64,48	45,35	35,28	22,18	12,10	7,6
0,99	P_{cd}^*	0,991	0,990	0,994	-	-	-
	$dW_p\%$	12,2	11,1	10	-	-	-
	K_i^*	K_5	K_2	K_1	-	-	-
	p_d^*	0,953	0,975	0,988	-	-	-
	n^*, m^*	40,35	18,16	10,9	-	-	-

Сводная таблица 3.6 позволяет найти оптимальные структуры резервирования для заданной сетке требуемых безотказностей и реализуемых допусков 1-го и 2-го уровней. Например, требуемая безотказность резервированной подсистемы, равная 0,96 может быть обеспечена: при реализуемом допуске 33,3% структурой $n^* = 30$, $m^* = 20$; при реализуемом допуске 28,6% структурой $n^* = 21$, $m^* = 15$; при реализуемом допуске 25,0% структурой $n^* = 12$, $m^* = 9$; при реализуемом допуске 22,2% структурой $n^* = 9$, $m^* = 7$, при реализуемом допуске 20% структурой $n^* = 5$, $m^* = 4$. Аналогично, по таблице 3.6 находятся оптимальные структуры резервирования для других значений требуемой безотказности резервированной подсистемы ЛА. Таким образом, требуемая безотказность оптимизируемой подсистемы ЛА и назначенный допуск на смежную подсистему позволяют найти оптимальные параметры структуры пассивного резервирования.

Как и при оптимизации по комплексному линейному критерию, при оптимизации по комплексному относительному критерию для каждого значения $P_{тр}$ у многих допусков существует несколько оптимальных структур, соответствующих разным оптимальным кратностям резервирования. Например,

требуемую безотказность подсистемы $P_{\text{тр}} = 0,95$ обеспечивает допуск 33,3% второго уровня с оптимальной обобщенной кратностью K_4 (индивидуальной кратностью $K_4^{\text{и}} = 18/12$, $n^* = 18$, $m^* = 12$), при $P_{cd}^* = 0.951 > 0,950$, а также оптимальной обобщенной кратностью K_5 (индивидуальной кратностью $K_5^{\text{и}} = 24/16$, $n^* = 24$, $m^* = 16$), при $P_{cd}^* = 0.957 > 0,950$. Аналогично, требуемую безотказность подсистемы $P_{\text{тр}} = 0,96$ обеспечивает допуск 25% первого уровня: с оптимальной обобщенной кратностью K_3 (индивидуальной кратностью $K_3^{\text{и}} = 12/9$, $n^* = 12$, $m^* = 9$), при $P_{cd}^* = 0.963 > 0,960$; с оптимальной обобщенной кратностью K_4 (индивидуальной кратностью $K_4^{\text{и}} = 16/12$, $n^* = 16$, $m^* = 12$), при $P_{cd}^* = 0.966 > 0,960$; с оптимальной обобщенной кратностью K_5 (индивидуальной кратностью $K_5^{\text{и}} = 20/15$, $n^* = 20$, $m^* = 15$), при $P_{cd}^* = 0.969 > 0,960$ и т.д. Поэтому, в таблице 3.6 для каждого обеспечивающего требуемую безотказность допуска представлены наиболее простые оптимальные структуры резервирования, соответствующие минимально возможным оптимальным кратностям резервирования.

Для наглядного представления результатов, представленных в таблице 3.6, на рисунке 3.21 и 3.22 показаны зависимости оптимальной численности элементов, входящих в оптимальную структуру (n^* и m^*) от значений реализуемых допусков для различных величин требуемой безотказности резервированных подсистем ЛА.

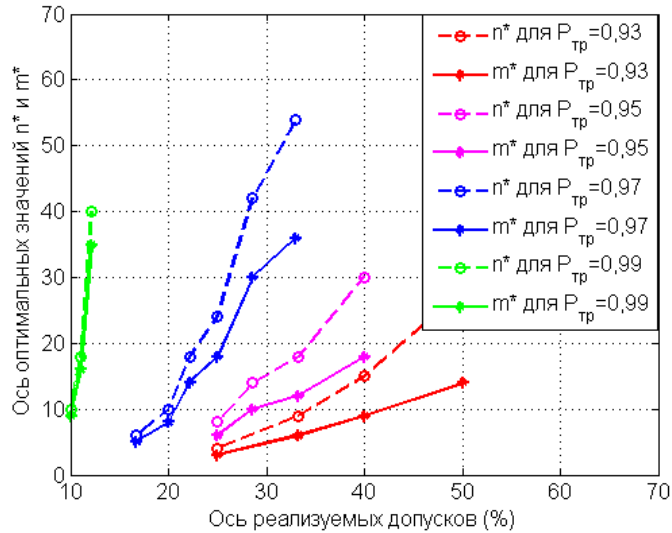


Рисунок 3.21 Графики зависимостей n^* , m^* от значений реализуемых допусков для различных $P_{тр} = 0,93; 0,95; 0,97; 0,99$

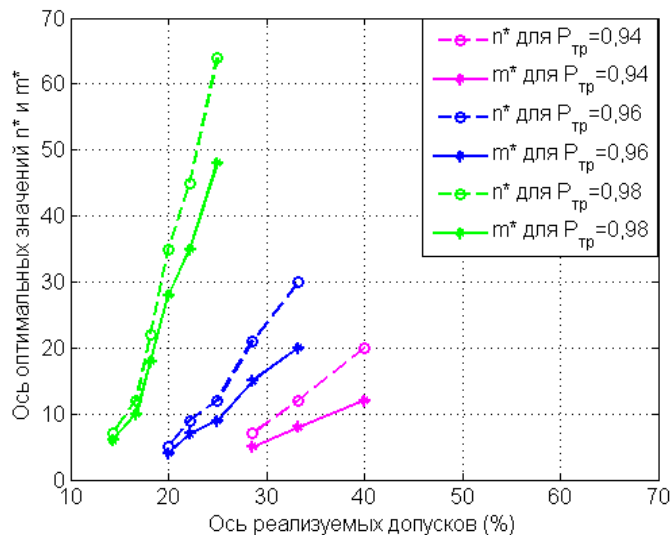


Рисунок 3.22 Графики зависимостей n^* , m^* от значений реализуемых допусков для различных $P_{тр} = 0,94; 0,96; 0,98$

Анализ представленных в таблицах и графиках результатов подраздела 3.5 позволяет установить следующие закономерности:

1. Оптимальные значения комплексного относительного критерия dP_c^* при любых рассмотренных значениях реализуемых допусков монотонно возрастают с ростом кратности резервирования K_i и при любом значении кратности резервирования K_i монотонно убывают с уменьшением реализуемых допусков.

2. Оптимальные значения частного показателя p_d^* , определяющего безотказность элементов, монотонно убывают с ростом кратности резервирования K_i при реализуемых допусках 1-го уровня, меньших 25%, и второго уровня, меньших 40%, а при допусках, не меньше указанных значений, сначала возрастают не более 5%, а затем монотонно убывают с ростом кратности резервирования.

3. Оптимальные значения безотказности резервированных подсистем P_{cd}^* можно увеличить в интересах удовлетворения техническим требованиям либо уменьшением реализуемых допусков при любой заданной кратности резервирования K_i , либо увеличением кратности резервирования K_i при заданном допуске.

4. Оптимальные значения безотказности резервированных подсистем P_{cd}^* монотонно возрастают с уменьшением реализуемых допусков, стремясь к единице при приближении реализуемого допуска к нулю, при любой кратности резервирования.

5. При допусках более 25% и высоких требованиях к безотказности резервированных подсистем (более 0,98) решение задачи синтеза может быть получено только при больших кратностях резервирования, когда оптимальная численность элементов резервированной подсистемы n^* может достигать 50 и выше, а при допусках менее 25% и тех же высоких требованиях к безотказности подсистем оптимальная кратность резервирования K_i^* резко уменьшается, обеспечивая решение задачи синтеза при оптимальной численности n^* не выше 10 - 18 элементов.

6. При допусках менее 25% и невысоких требованиях к безотказности резервированных подсистем (менее 0,95), а также допусках больше 28,6% и высоких требованиях к безотказности резервированных подсистем (более 0,95) решение задачи синтеза (получения оптимальных параметров структуры) не

существует (при исследованных диапазонах параметров), поэтому требования по безотказности резервированных подсистем при таких условиях могут быть удовлетворены только не оптимальными структурами резервирования.

3.6 Сравнение результатов решения задач синтеза структур пассивного резервирования по линейному и относительному комплексным критериям

Проиллюстрируем графически результаты оптимизации частных показателей по линейному и относительному комплексным критериям. Полный набор графических представлений указанных зависимостей можно найти в приложении В.

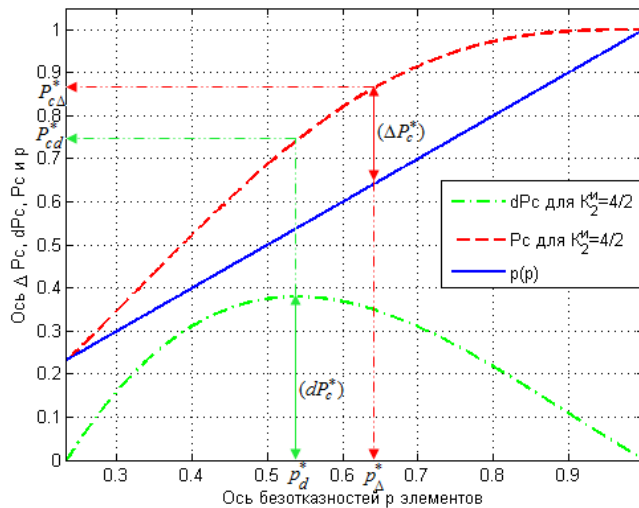


Рисунок 3.23 Зависимости $\Delta P_c(p)$, $dP_c(p)$ и значения $\Delta P_c^*(K_2^И)$, $P_{cd}^*(K_2^И)$,

$$P_{\Delta}^*(K_2^И), dP_c^*(K_2^И), P_{cd}^*(K_2^И), p_{\Delta}^*(K_2^И)$$

На рисунке 3.23 для допуска 50% первого уровня и индивидуальной кратности $K_2^И = 4/2$ показаны: красными линиями со стрелками - величина комплексного линейного критерия $\Delta P_c^* = 0,224$ и соответствующие ему величины частных показателей $P_{cd}^* = 0,863$, $p_{\Delta}^* = 0,639$ (числовые значения показателей взяты из таблицы 3.1); зелеными линиями со стрелками – величина комплексного относительного критерия $dP_c^* = 0,380$ и соответствующие ему величины частных

показателей $P_{cd}^* = 0,742$, $p_d^* = 0,532$ (числовые значения показателей взяты из таблицы 3.4). Следует отметить, что оптимальные значения комплексных линейного и относительного критериев не сопоставимы друг с другом и не представляют интереса в данном исследовании в отличие от оптимальных значений частных показателей. Из рисунка 3.23 также видно, что при реализуемом допуске 50% и индивидуальной кратности 4/2 оптимизация по комплексному линейному критерию обеспечивает более высокие требования к безотказности пассивно резервированных подсистем по сравнению с комплексным относительным критерием ($0,863 > 0,742$). Однако оптимизация по комплексному относительному критерию обеспечивает реализацию более низких требований к безотказности элементов пассивно резервированных подсистем по сравнению с комплексным линейным критерием ($0,532 < 0,639$).

Для сопоставления результатов решения задач оптимизации построим графики $P_{c\Delta}^* = P_{c\Delta}^*(K_i^и)$, $P_{\Delta}^* = P_{\Delta}^*(K_i^и)$, $P_{cd}^* = P_{cd}^*(K_i^и)$, $p_d^* = p_d^*(K_i^и)$ в одних осях координат для допусков 66,7%; 50%; 40%; 22,2% и 20%. Полный набор графических представлений указанных зависимостей можно найти в приложении Г.

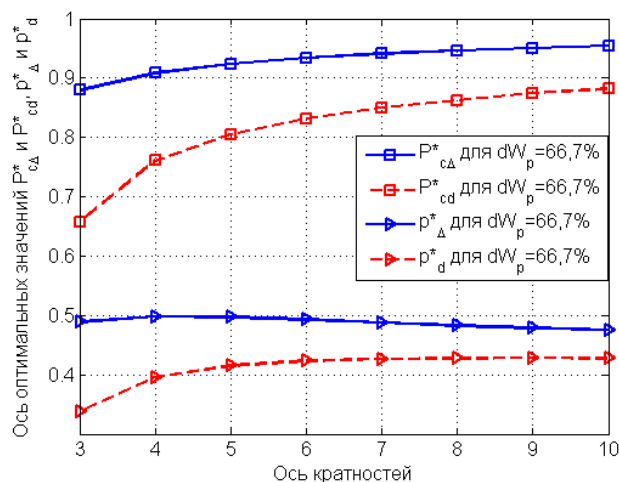


Рисунок 3.24 Графики сравнение зависимостей $P_{c\Delta}^*$ и P_{cd}^* , P_{Δ}^* и p_d^* для допуска $dW_p = 66,7\%$

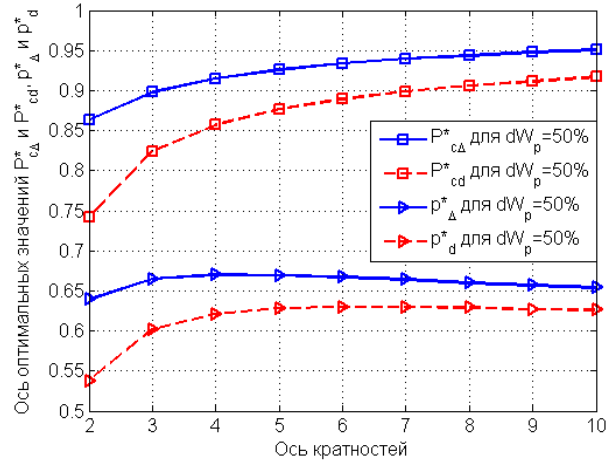


Рисунок 3.25 Графики сравнение зависимостей $P_{сд}^*$ и $P_{сд}^*$, P_{Δ}^* и P_{Δ}^* для допуска $dW_p=50\%$ 1-го уровня

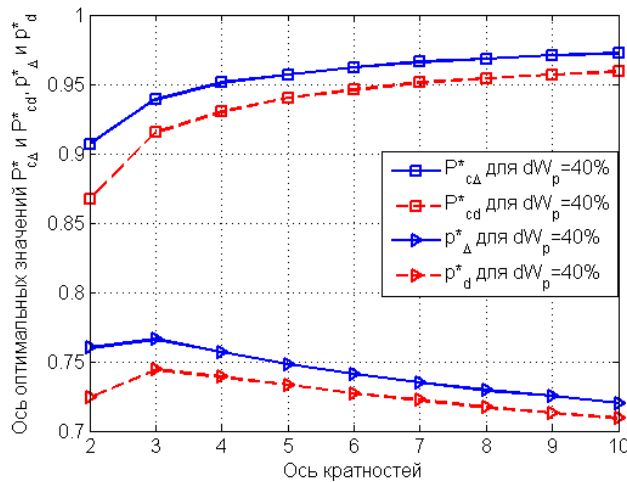


Рисунок 3.26 Графики сравнение зависимостей $P_{сд}^*$ и $P_{сд}^*$, P_{Δ}^* и P_{Δ}^* для допуска $dW_p=40\%$

Графики на рисунках 3.24, 3.25, 3.26 и числовые данные в таблицах 3.1, 3.2, 3.4, 3.5 показывают, что оптимальные значения искомых частных показателей, найденные по комплексному линейному и комплексному относительному критериям при больших допусках (более 20%) существенно отличаются. Причем, с ростом допуска эти различия резко возрастают. Различия проявляются также в том, что оптимизация по комплексному относительному критерию дает более низкие оптимальные значения и безотказности элементов, и безотказности

резервированной подсистемы по сравнению с аналогичными показателями, получаемыми при оптимизации по комплексному линейному критерию. Поэтому, при необходимости решения задачи синтеза структуры из сравнительно малонадежных элементов целесообразно использовать комплексный относительный критерий. Если же при решении задачи синтеза необходимо получить более высокие оптимальные значения безотказности резервированной подсистемы, то целесообразно использовать комплексный линейный критерий.

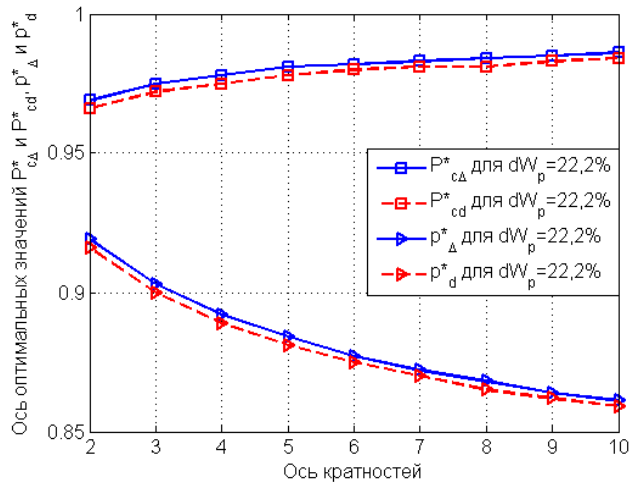


Рисунок 3.27 Графики сравнение зависимостей $P_{сд}^*$ и $P_{сд}^*$, $P_{д}^*$ и $P_{д}^*$ для допусков $dW_p = 22,2\%$

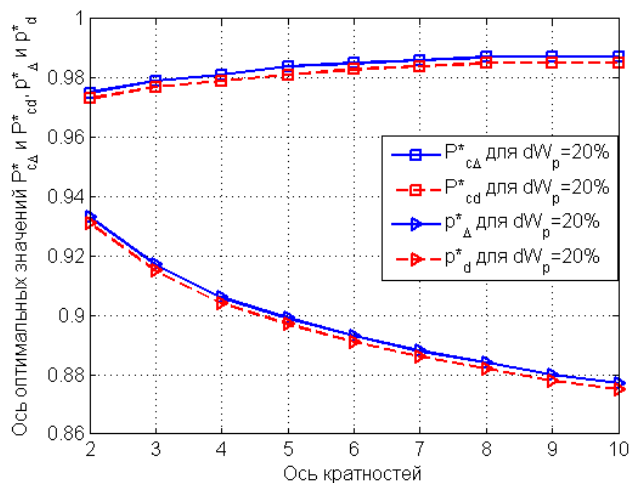


Рисунок 3.28 Графики сравнение зависимости $P_{сд}^*$ и $P_{сд}^*$, $P_{д}^*$ и $P_{д}^*$ для допусков $dW_p = 20\%$ 2-го уровня

Графики на рис. 3.27 и 3.28 показывают, что при малых реализуемых допусках (не выше 20%) искомые оптимальные значения частных показателей при оптимизации по обоим комплексным критериям (относительному и линейному) практически совпадают. Поэтому решение задачи синтеза при “жестких” назначаемых и реализуемых допусках как по линейному, так и по относительному комплексным критериям дают близкие результаты. Это подтверждается сравнением итоговых таблиц 3.3, 3.6 и графиков на рис. 3.27 и 3.28.

Ниже для удобства сопоставления графиков на рисунках 3.15 и 3.23, а также 3.16 и 3.24 и анализа результатов синтеза структур резервирования приведем их ниже в уменьшенном виде.

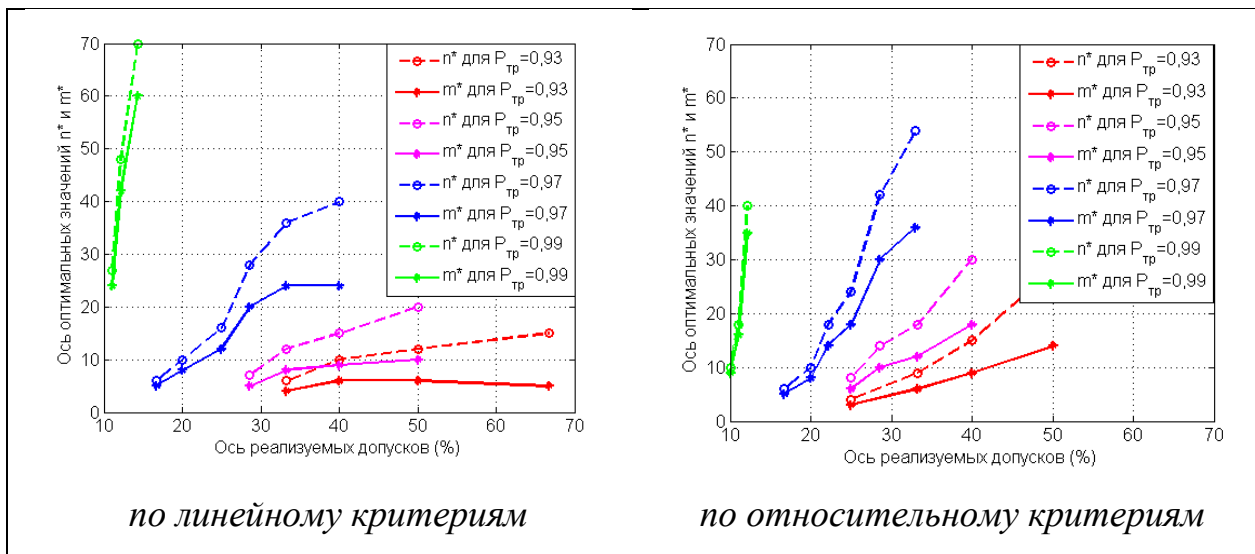


Рисунок 3.29 Сравнение результатов синтеза по линейному и относительному критерию для требуемых величин безотказностей $P_{тр} = 0,93; 0,95; 0,97; 0,99$

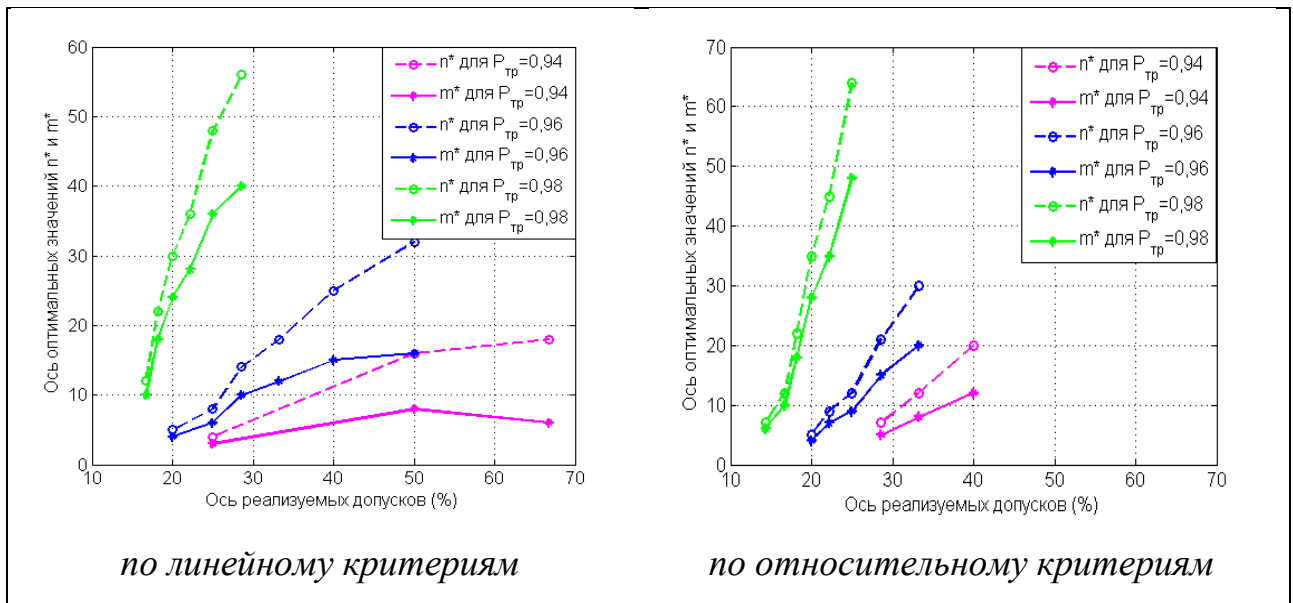


Рисунок 3.30 Сравнение результатов синтеза по линейному и относительному критерию для требуемых безотказностей для требуемых величин безотказностей $P_{тр} = 0,94; 0,96; 0,98$

Графики на рис. 3.29 и 3.30 также показывают, что при малых допусках не больше 20% результаты синтеза по двум комплексным критериям практически совпадают. С ростом допуска различия в результатах синтеза структуры по комплексному линейному и комплексному относительному критерию быстро возрастают. Причем, при одинаковых допусках оптимальные структуры, синтезированные по комплексному относительному критерию имеют значительно больший размер, чем оптимальные структуры, синтезированные по комплексному линейному критерию. Таким образом, при одинаковых реализуемых допусках больше 20% оптимальные структуры, синтезированные по комплексному линейному критерию, имеют меньший размер, чем по комплексному относительному критерию и разница в размерах структур с ростом допуска быстро возрастает. Приведем числовые данные, подтверждающие эти важные для практики выводы. Так, из таблиц 3.3 и 3.6 следует:

$P_{тр}=0,93$, при реализуемом допуске $dW_p=33,3\%$ структура, синтезированная по комплексному относительному критерию (КОК) равна $n^*/m^* = 9/6$, а по

комплексному линейному критерию (КЛК) равна $n^*/m^* = 6/4$; при $dW_p = 40\%$ структура, синтезированная по (КОК) равна $n^*/m^* = 15/9$, а по (КЛК) равна $n^*/m^* = 10/6$; при $dW_p = 50\%$ структура, синтезированная по (КОК) равна $n^*/m^* = 28/14$, а по (КЛК) равна $n^*/m^* = 12/6$;

$P_{тр} = 0,96$, при $dW_p = 20\%$ структура, синтезированная по (КОК) равна $n^*/m^* = 5/4$ и по (КЛК) равна $n^*/m^* = 5/4$; при $dW_p = 25\%$ структура, синтезированная по (КОК) равна $n^*/m^* = 12/9$, а по (КЛК) равна $n^*/m^* = 8/6$; при $dW_p = 33,3\%$ структура, синтезированная по (КОК) равна $n^*/m^* = 30/20$, а по (КЛК) равна $n^*/m^* = 18/12$;

$P_{тр} = 0,97$, при $dW_p = 16,7\%$ структура, синтезированная по (КОК) равна $n^*/m^* = 6/5$ и по (КЛК) равна $n^*/m^* = 6/5$; при $dW_p = 20\%$ структура, синтезированная по (КОК) равна $n^*/m^* = 10/8$ и по (КЛК) равна $n^*/m^* = 10/8$; при $dW_p = 25\%$ структура, синтезированная по (КОК) равна $n^*/m^* = 24/18$, а по (КЛК) равна $n^*/m^* = 16/12$; при $dW_p = 33,3\%$ структура, синтезированная по (КОК) равна $n^*/m^* = 54/36$, а по (КЛК) равна $n^*/m^* = 30/20$.

Из графиков на рисунках 3.29 и 3.30 так же видно, что при решении задачи синтеза по обоим комплексным критериям с ростом требований по безотказности оптимальные структуры смещаются в область малых допусков, т.е. с ростом $P_{тр}$ графики зависимостей оптимальных значений параметров структур от реализуемых допусков становятся все более и более вертикальными.

3.7 Выводы по главе 3

В результате проведенных в третьей главе исследований получены следующие результаты:

1) Установлено, что в каждом допуске для каждой индивидуальной кратности резервирования существуют экстремальные значения безотказности резервированной подсистемы ЛА по отношению к безотказности ее элементов, которые возрастают с увеличением кратности резервирования, что позволяет поставить задачу синтеза структуры подсистемы;

2) Показано, что задача синтеза структуры пассивно резервированной подсистемы ЛА сводится к решению двух критериальной задачи оптимизации – максимизации безотказности резервированной подсистемы и минимизации безотказности входящих в нее элементов;

3) Выбраны два метода свертки (сведения) частных показателей к комплексным критериям – в линейном виде и в виде отношения частных показателей;

4) Поставлена задача синтеза структуры пассивно резервированной подсистемы ЛА с учетом допусков по двум комплексным критериям – комплексному относительному и комплексному линейному;

5) Разработана двух этапная методика решения задачи синтеза структуры подсистемы ЛА, когда сначала решается ослабленная задача (без учета требований по безотказности), а затем решается исходная задача;

6) Получено решение задачи синтеза по двум комплексным критериям, показавшее диапазоны изменения оптимальных структур и соответствующих им допусков в зависимости от требуемых величин безотказностей, предъявляемых к подсистемам ЛА;

7) Проведено сравнение результатов синтеза структур по комплексному относительному и комплексному линейному критериям, показавшее существенное различие результатов при допусках более 20% и одинаковые результаты при допусках не более 20%;

8) Установлено, что при одинаковых допусках более 20% структуры резервирования, синтезированные по комплексному линейному критерию имеют меньший размер (менее сложны), чем по комплексному относительному критерию, причем разница в размерах быстро увеличивается с ростом реализуемых допусков;

9) Показано, что при необходимости решения задачи синтеза структуры из сравнительно малонадежных элементов целесообразно использовать комплексный относительный критерий. Если же при решении задачи синтеза

необходимо получить более высокие оптимальные значения безотказности резервированной подсистемы, то целесообразно использовать комплексный линейный критерий;

10) Показано, что с возрастанием требований по безотказности к подсистеме ЛА оптимальные структуры смещаются в область малых допусков при решении задачи синтеза по обоим комплексным критериям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных диссертационных исследований получены следующие результаты и выводы:

1. Показано, что при исследовании и разработке пассивно резервированных подсистем с учетом доусков необходимо использовать допуски назначаемые и допуски реализуемые, которые существенно различаются по способу задания и шкале их значений;

2. Для удобства использования реализуемых допусков предложено делить их по уровням;

3. Выявлено, что каждый реализуемый допуск может быть обеспечен линейкой (шкалой) возрастающих кратностей, начиная с минимальной, позволяющих удовлетворять требуемые значения безотказностей подсистем ЛА;

4. Установлено, что пассивное резервирование с учетом допусков реализуется двумя принципиально разными способами – кратным и некратным резервированием, причем наиболее значимыми для практики по количеству и разнообразию значений являются допуски, реализуемые методами некратного резервирования;

5. Показано, что подсистемы с некратным пассивным резервированием имеют значения вероятностей элементов, называемых критическими p_{kr} , которые определяют существование докритических областей ($0 - p_{kr}$), где резервирование не выгодно;

6. Выявлен разный характер изменения критических значений p_{kr} в зависимости от индивидуальных кратностей для различных значений допусков и их уровней: так при допусках первого уровня, больших 25%, с ростом кратности p_{kr} возрастают и, меньших 25%, с ростом кратности убывают, увеличивая диапазон вероятностей, где выгоден данный вид резервирования. Аналогичный

характер изменения p_{kr} имеет место относительно допуска 28,6% для допусков второго уровня;

7. Разработана модель для исследования безотказности пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков на основе использования их структурной схемы надежности;

8. Проведено исследование зависимости показателя безотказности от: индивидуальной кратности резервирования, величины реализуемого допуска и безотказности элементов, показавшее возможность постановки задачи синтеза структуры пассивного резервирования с учетом допусков;

9. Выявлено, что повышение кратности некратного резервирования является основным средством достижения высоких величин показателя безотказности пассивно резервированных подсистем при “жестких” реализуемых допусках (менее 25,0%) и любых значениях безотказности элементов p , а также при больших допусках (не менее 25%) и безотказности элементов более 0,65;

10. Установлено, что минимальные величины индивидуальных кратностей резервирования обеспечивают наилучшие значения безотказности пассивно резервированных подсистем ЛА данного класса только при малонадежных элементах ($p < 0,600$) и больших реализуемых допусках (не менее 25,0%). Таким образом, не существует допусков, при которых всегда выгодно применять минимальную индивидуальную кратность резервирования;

11. Поставлена задача синтеза по двум комплексным критериям, полученным путем сведения частных показателей – безотказности подсистемы и безотказности элементов подсистемы в виде их отношения и в виде линейной свертки;

12. Разработана методика решения задачи синтеза по двум комплексным критериям в два этапа: сначала решается ослабленная задача (без учета требований по безотказности, предъявляемых к системе), а затем решается исходная задача;

13. Получено решение задачи синтеза по комплексному линейному критерию в диапазоне реализуемых допусков от 10% до 50% и в диапазоне требуемой безотказности от 0,93 до 0.99;

14. Получено решение задачи синтеза по комплексному относительному критерию в диапазоне реализуемых допусков от 10% до 50% и в диапазоне требуемой безотказности от 0,93 до 0.99;

15. Проведено сравнение результатов решения задачи синтеза по комплексным линейному и относительному критериям и даны рекомендации по их использованию;

16. Установлено, что при одинаковых допусках не менее 20% структуры резервирования, синтезированные по комплексному линейному критерию имеют меньший размер (менее сложны), чем по комплексному относительному критерию, причем разница в размерах быстро увеличивается с ростом величины реализуемого допуска;

17. Показано, что при реализуемых допусках больше 20% комплексный относительный критерий выгодно применять в случае использования сравнительно малонадежных элементов, а комплексный линейный критерий - при необходимости удовлетворения более высоким требованиям по безотказности;

18. Установлено, что при реализуемых допусках не более 20% оптимальные значения искомых частных показателей (безотказности резервированной системы и безотказности ее элементов), найденным по комплексному линейному и комплексному относительному критериям, практически совпадают, а результаты синтеза близки друг к другу и следовательно, в этом диапазоне допусков можно проводить синтез по любому из двух комплексных критериев;

19. Проведенные исследования показали широкие возможности и перспективность предложенного подхода к решению поставленной задачи синтеза.

В заключение следует отметить, что в работе рассмотрены реализуемые допуски только двух уровней. Расширение диапазона уровней реализуемых допусков позволяет раскрыть более полно все богатство структур пассивного резервирования и возможных решений задачи синтеза в зависимости от назначенных допусков и требований по безотказности подсистем ЛА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агамиров Л.В., Райхер В.Л. Вероятностные методы расчета показателей надежности авиационных конструкций при переменных нагрузках / Л.В. Агамиров, В.Л. Райхер. - М.: МЭИ, 2018. - 203 с.
2. Агамиров Л.В., Агамиров В.Л., Вестяк В.А. Статистический анализ результатов испытаний изделий авиационной техники в условиях случайного цензурирования / Л.В. Агамиров, В.Л. Агамиров, В.А. Вестяк // Программные продукты и системы. - 2017. - №1. - С.124-129.
3. Анатолий Бойко, Александр Бондаренко, Виктор Савченко. Исследование динамики изменений показателей надёжности пассивно резервированной системы при исправном и дублирующем элементах / Анатолий Бойко, Александр Бондаренко, Виктор Савченко // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. - 2013. - No 3. - С. 306-312.
4. Анищенко В. А., Северин Л. А. Методика выбора невозстанавливаемых резервированных систем управления технологическими процессами / В. А. Анищенко, Л. А. Северин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. - 2008. - № 2. - С. 5-10.
5. Анищенко В. А. Надежность и точность троированных измерений аналоговых технологических переменных / В. А. Анищенко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. - 2017. - № 2. - С. 108-117.
6. Анцелиович Л.Л. Надежность, безотказность и живучесть самолета / Л.Л. Анцелиович. – М.: Машиностроение, 1985. - С. 98.
7. Байков И.Р., Китаев С.В., Файрушин Ш.З. Оценка показателей надёжности насосов типа НК, НКВ и НПС / И.Р. Байков, С.В. Китаев, Ш.З. Файрушин // Надежность. - 2016. - № 16(4). - С. 11-16.

8. Байков И.Р., Китаев С.В., Смородова О.В. Комплекс показателей для оценки надежности газоперекачивающих агрегатов / И.Р. Байков, С.В. Китаев, О.В. Смородова // Надежность. - 2018. - № 18(4). - С. 16-21.
9. Бессонов А.А., Мороз А.В. Надежность систем автоматического регулирования / А.А. Бессонов, А.В. Мороз. - Л.: Энергоатомиздат, - 1984. - 36с.
10. Богачев А.П., Попов И.Л. Проектирование технической системы связи по заданным показателям надежности: Учебно-методическое пособие / А.П. Богачев, И.Л. Попов. - М.: РУТ (МИИТ), 2017. - 23 с.
11. Бойко А.И. Математическая формализация описания состояний и переходов пассивно резервируемых технических систем / А.И. Бойко // Вестник ХНТУСГ им. Василенка. - 2013. - Вып. 133. - С. 216-219.
12. Бондарь Д.С., Прохоров А.В. Анализ показателей надежности аэродромных систем управления воздушным движением / Д.С. Бондарь, А.В. Прохоров // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2016. - Т. 19, № 05. - С. 118–123.
13. Бондаренко В. В. Надежность технических систем и техногенный риск : курс лекций / В. В. Бондаренко. - Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. - 116 с.
14. Буренин В.В., Кириллова Н. П. Надежность технических систем объектов наземных комплексов: учеб. Пособие / В.В. Буренин, Н. П. Кириллова. - М.: МАДИ, 2017. - 88 с.
15. Варнаков Д.В. Влияние метода прогнозирования достаточной надежности по обобщенному параметру на динамическую характеристику авто-транспортных средств / Д.В. Варнаков Д.В. // Международный технико-экономический журнал. - 2012. - № 2. - С. 113-119.
16. Варнаков Д.В. Использование диагностических параметров при оценке и прогнозировании параметрической надежности двигателей автотранспортных средств/ Д.В. Варнаков. Ульяновск: УлГУ, 2013. - 124 с.
17. Варнаков Д.В., Дидманидзе О.Н. Теоретические основы концепции технического сервиса машин по фактическому состоянию на основе оценки их

- параметрической надежности / Д.В. Варнаков, О.Н. Дидманидзе // Аграрная наука Евро-Северо-Востока, 2017. - № 2 (57). - С. 67 - 71.
18. Варжапетян А.Г., Глущенко П.В., Гусман Ю.А., Пичугин Ю.А. Вероятностные оценки надежности динамических систем, характеризующихся большим количеством параметров / А.Г. Варжапетян, П.В. Глущенко, Ю.А. Гусман, Ю.А. Пичугин // Надежность. - 2016, - № 16(1). - С.14 - 23.
19. Вентель Е.С. Введение в исследование операций / Е.С. Вентель. - М.: Советское Радио, 1964. - 391с.
20. Ветлугин К.А., Струков А.В. Алгоритмы автоматизированного структурно-логического моделирования надежности и безопасности информационных и телекоммуникационных систем. Учебное пособие / К.А. Ветлугин, А.В. Струков. СПб. ПГУПС, 2016.
21. Викторова В.С., Свердлик Ю.М., Степанянц А.С. Анализ надежности систем сложной структуры на многоуровневых моделях / В.С. Викторова, Ю.М. Свердлик, А.С. Степанянц // Автоматика и Телемеханика. - 2010. - № 7. - С.143-148.
22. Викторова В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем / В.С. Викторова, А.С. Степанянц. - М.: Ленанд, 2014. – 33с.
23. Викторова В.С., Степанянц А.С. О показателях надежности типа средняя наработка / В.С. Викторова, А.С. Степанянц // Надежность. – 2014. - № 4. - С. 27-46.
24. Ву Чонг Туан. Учет существенных факторов и ограничений при исследовании и разработке пассивно резервированных подсистем летательных аппаратов с учетом допусков / Гришин В. М., Туан В. Ч. // Современные информационные технологии и ИТ-образование. - 2019. - № 1. - С. 124-132.
25. Ву Чонг Туан. Исследование способов повышения безотказности пассивно резервированных подсистем управления летательными аппаратами с учетом

- допусков / Гришин В. М., Чонг Туан Ву // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. - 2020. - № 1. - С. 18-28.
26. Ву Чонг Туан. Синтез структуры пассивного резервирования подсистем летательных аппаратов с учетом допусков / В. М. Гришин, Ву Чонг Туан // Научно-технический вестник Поволжья. - 2020. - № 3. - С. 28-35.
27. Ву Чонг Туан. Оптимизация безотказности пассивно резервированных технических подсистем с учетом допусков [Электронный ресурс]/ В.М. Гришин, Ч.Т. Ву // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. - 2020. - № 8(1). Режим доступа: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/02/GrishinVu_1_20_1.pdf
28. Ву Чонг Туан. Особенности исследования и разработки пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков / Гришин В.М., Ву Чонг Туан // Системный анализ, управление и навигация: тезисы доклада XXIII Международной конференции (г. Евпатория, Крым, 1- 8 июля. 2018 г.). - Москва, 2018. - С. 75-78.
29. Ву Чонг Туан. Учет допусков в задачах проектирования аэрокосмических систем / Гришин В.М., Ву Чонг Туан // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации: тезисы доклада XXVII Международной конференции (г. Алушта, Республика Крым, 14–20 сентября 2018 г.). - Тамбов Издательство ФГБОУ ВО ТГТУ, 2018. - С. 167–168.
30. Ву Чонг Туан. Исследование влияния существенных параметров на безотказность пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков / Ву Т. Ч., Гришин В.М. // Авиация и космонавтика: тезисы доклада 17-ой Международной конференции (г. Москва, МАИ, 19 – 23 ноября. 2018 г.). - Москва, 2018. - С. 430-432.
31. Ву Чонг Туан. Выбор оптимальных параметров структур пассивно резервированных подсистем летательных аппаратов с учетом допусков /

- Гришин В.М., Ву Чонг Туан // Системный анализ, управление и навигация: тезисы доклада XXIV Международной конференции (г. Евпатория, Крым, 30 июня – 7 июля. 2019 г.). - Москва, 2019. - С. 100-103.
32. Ву Чонг Туан. Анализ особенностей подсистем летательных аппаратов с учетом допусков и способов повышения их безотказности / Ву Чонг Туан, Гришин В.М. // Авиация и космонавтика: тезисы доклада 18-ой Международной конференции (г. Москва, МАИ, 19 – 23 ноября. 2019 г.). - Москва, 2019. - С.83-84.
33. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности: Основные характеристики надежности и их статистический анализ. Изд.2 / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. - М.: URSS, 2013. - 584 с.
34. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. - М.: Стандартинформ, 2016. - 28 с.
35. Горелик, А. В. Практикум по основам теории надежности: учебное пособие / А.В. Горелик, О.П. Ермакова. - М.: УМЦ ЖДТ (Маршрут), 2013. - 133 с.
36. Григорьян С. Г. Техническая диагностика и надёжность систем управления / С.Г. Григорьян. - Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2017. - 51 с.
37. Гришин В.М., Пьо Маунг Ко. Оптимизация безотказности одного класса компонентов систем управления ЛА при активном нагруженном резервировании / В.М. Гришин, Пьо Маунг Ко // Вестник МАИ. - 2009. - №1. - С. 116-123.
38. Гришин В.М., Пьо Маунг Ко. Оптимизация безотказности систем управления ЛА при активном нагруженном резервировании / В.М. Гришин, Пьо Маунг Ко // Вестник МАИ. - 2009. - №5. - С. 52-59.

39. Губий Е.В. Математическая модель анализа надежности топливоснабжения отдаленных населенных пунктов биомассой с энергетических плантаций / Е.В. Губий // Вестник ИрГТУ. - 2018. - № 7. - С. 102-113.
40. Дедков В.К., Татуев А.И. Обеспечение надежности технических объектов по стадиям их жизненного цикла / В.К. Дедков, А.И Татуев. М.: Машиностроение – Полёт, 2010. - 76с.
41. Дидманидзе О.Н., Варнаков Д.В. Прогнозирование параметрической надежности двигателей автотранспортных средств в нормальном и специальном эксплуатационных режимах / О.Н. Дидманидзе, Д.В. Варнаков // Международный технико-экономический журнал. - 2013. - № 3. - С. 94–98.
42. Дидманидзе О.Н., Варнаков Д.В. Результаты разработки метода и системы оперативного контроля и прогнозирования параметрической надежности в специальных эксплуатационных режимах / О.Н. Дидманидзе, Д.В. Варнаков // Международный технико-экономический журнал. - 2013. - № 4. - С. 71-79.
43. Дидманидзе О.Н., Дидманидзе Б.С., Варнаков В.В., Варнаков Д.В., Варнакова Е.А., Хабиева Л.Л. Обеспечение надежности техники путем проведения комплексной оценки качества поставок запасных частей при организации технического сервиса / О.Н. Дидманидзе, Б.С. Дидманидзе, В.В. Варнаков, Д.В. Варнаков, Е.А. Варнакова, Л.Л. Хабиева // Международный технико-экономический журнал. М.: ООО «Спектр», 2014. - № 5. - С. 31–40.
44. Дидманидзе О.Н., Варнаков Д.В., Варнаков В.В. Концепция технического сервиса по фактическому состоянию машин на основе оценки их параметрической надежности / О.Н. Дидманидзе, Д.В. Варнаков, В.В. Варнаков // Вестник Технический сервис в АПК. - 2016. - № 2. - С. 51-57.
45. Дорохов А.Н. Обеспечение надежности сложных технических систем / А.Н. Дорохов. - СПб. : Лань, 2011.

46. Егоров И.В. Имитационная модель надежности резервированной вычислительной системы с периодическим восстановлением информации / И.В. Егоров // Надежность. - 2018. - № 18(3). - С. 10-17.
47. Епифанов А.Д. Надежность систем управления / А.Д. Епифанов. - М.: Машиностроение, 1975. - 180с.
48. Жаднов В.В., Артюхова М.А. Прогнозирование показателей надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов при воздействии ионизирующих излучений низкой интенсивности / В.В. Жаднов, М.А. Артюхова // Надежность. - 2015. - № 1. - С. 13-24.
49. Зайко Ю.Г., Искандарова Л.Н., Трахтомиров А.В. Имитационная модель для расчета показателей надежности резервированных радиоэлектронных систем / Ю.Г. Зайко, Л.Н. Искандарова, А.В. Трахтомиров // Надежность. - 2016. - № 16(3). - С. 8-17.
50. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Надежность авиационной техники. Пособие по выполнению практических занятий «Оценка показателей надежности авиационной техники» / А.А. Ицкович, И.А. Файнбург. - М.: МГТУ ГА, 2012.
51. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Основы теории надежности. Ч.1. Учебное пособие / А.А. Ицкович, И.А. Файнбург. - М.: МГТУ ГА, 2013.
52. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Основы теории надежности: пособие по изучению дисциплины и выполнению курсовой работы «Оценка показателей надежности авиационной техники» / А.А. Ицкович, И.А. Файнбург. - М.: МГТУ ГА, 2015. - 68 с.
53. Котальников В. В., Шапарь Ю. В. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие / В. В. Котальников, Ю. В. Шапарь. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – С. 22.
54. Киндеев Е.А. Учебное пособие к курсу лекций по дисциплине «Надежность технических систем и техногенный риск» / Е.А. Киндеев. – Владимир: Владимирский государственный университет, 2016. - С. 40.

55. Коваленко В.Н. Надежность устройств железнодорожной автоматики, телемеханики : учеб. Пособие / В.Н. Коваленко. - Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2013. - 87 с.
56. Кокушин Н.Н., Тихонов А.А., Петров С.Г. Основы теории надежности: учебное пособие / Н.Н. Кокушин, А.А. Тихонов, С.Г. Петров. - СПб., 2011. - 77 с.
57. Корчагин, А. Б. Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1 : Основы теории / А. Б. Корчагин, В. С. Сердюк, А. И. Бокарев. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. - 228 с.
58. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б.А. Козлов, И.А. Ушаков. М.: Сов. радио, 1975. - 472 с.
59. Кривопапов Д.М., Юркевич Е.В. Матричная форма функций вероятностей безотказной работы систем с ненагруженным резервированием (ч.2) / Д.М. Кривопапов, Е.В. Юркевич // Надежность. - 2018, - № 18(1). - С. 20-25.
60. Литвиненко Р.С. Имитационная модель процесса функционирования электротехнического комплекса с учетом надежности его элементов / Р.С. Литвиненко // Надежность. -2016. - № 16(1). - С. 37-47.
61. Луговцова Н.Ю. Надежность технических систем и техногенный риск / Н.Ю. Луговцова. – Юрга: Типография ООО «МедиаСфера», 2015. - 94 с.
62. Малафеев С.И., Копейкин А.И. Надежность технических систем. Примеры и задачи : учебное пособие / С.И. Малафеев, А.И. Копейкин. - СПб.: Лань, 2012. - 320 с.
63. Милёхин Ю.М., Берсон А.Ю., Кавицкая В.К., Еренбург Э.И. Надежность ракетных двигателей на твердом топливе / Ю.М. Милёхин, А.Ю. Берсон, В.К. Кавицкая, Э.И. Еренбург. - М.: ООО “Эврика”, 2005. - 179 с.
64. Можаяев А.С., Нозик А.А., Струков А.В. Оценка надежности системы из элементов с тремя состояниями с использованием ПК АРБИТР / А.С. Можаяев, А.А. Нозик, А.В. Струков // Труды СПИИРАН. - 2013, - №8 (31). - С. 123-147.

65. Можаяева И.А., Нозик А.А., Струков А.В. Особенности программной реализация методов количественного анализа риска аварий опасных производственных объектов на основе логико-вероятностного моделирования / И.А. Можаяева, А.А. Нозик, А.В. Струков // Промышленность и безопасность. - 2016. - №8. - С. 34-37.
66. Можаяева И.А., Нозик А.А., Струков А.В. Алгоритмы автоматизированного структурно - логического моделирования надежности и безопасности структурно-сложных систем / И.А. Можаяева, А.А. Нозик, А.В. Струков // Труды международной научной школы МАБР. - 2016. - С. 26.
67. Морозов Д.В., Чермошенцев С.Ф. Методика повышения надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата в полете при возникновении отказа в бортовой контрольно-проверочной аппаратуре / Д.В. Морозов, С.Ф. Чермошенцев // Надежность. - 2019; - №8 19(1). - С. 30-35.
68. Нозик А.А., Стрыков А.В., Можаяева И.А. Особенности программной реализации методов количественного анализа риска аварий ОПО на основе логико-вероятностного моделирования / А.А. Нозик, А.В. Стрыков, И.А. Можаяева // Промышленность и безопасность. - 2016, - №8 (106). - С. 34-37.
69. Нурутдинов А.Р., Фрид А.И. Способ резервирования цифровой вычислительной системы управления авиационным двигателем на основе многоуровневой модели / А.Р. Нурутдинов, А.И. Фрид // Авиакосмическое приборостроение. - 2004. - № 11. - С. 21-25.
70. Овчаренко В.Л. Надёжность технических систем и техногенный риск. – Донецк, Дон НТУ, 2015. – С. 69.
71. Пасько В.П. Моделирование надежности невосстанавливаемой квазимостикиковой структуры / В.П. Пасько // Математичні машини і системи. - 2013. - № 1. - С. 163-171.

72. Пегушин С.Л., Шумихин А.Г. Планирование технического обслуживания автоматических систем противоаварийной защиты производственных объектов с учетом оценки надежности и ремонтпригодности / С.Л. Пегушин, А.Г. Шумихин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. - 2012. - № 14. - С. 13-21.
73. Пегушин С.Л., Шумихин А.Г. Анализ экономической целесообразности резервирования при выборе средств систем противоаварийной защиты с учетом их надежностных характеристик / С.Л. Пегушин, А.Г. Шумихин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. - 2014. - № 3. - С. 7-14.
74. Половко А.М., Гуров С.И. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.И. Гуров. - СПб.: "БХВ – Петербург", 2006. - 247 с.
75. Порецкий П.С. Решение общей задачи теории вероятностей при помощи математической логики / П.С. Порецкий // Труды СПИИРАН. - 2015. - № 6(43). - С. 27-49.
76. Похабов Ю.П. Что понимать под расчётом надёжности уникальных высокоответственных систем применительно к механизмам одноразового срабатывания космических аппаратов / Ю.П. Похабов // Надежность. – 2018. - № 18(4). - С. 28-35.
77. Пью Маунг Ко, Гришин В.М. Оптимизация безотказности одного класса компонентов систем управления ЛА при активном нагруженном резервировании / Пью Маунг Ко, В.М. Гришин // «Вестник МАИ». - 2009. - №1.
78. Пью Маунг Ко Оптимизация безотказности систем управления латательных аппаратов при активном нагруженном резервировании. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.: 05.13.01 / Пью Маунг Ко. М.: МАИ, 2009. - 143 с.

79. Редько П.Г. Повышение безотказности и улучшение характеристик электрогидравлических следящих приводов / П.Г. Редько. - Магнитогорск: Издательский центр МГТУ "Станкин" "Янус – К", 2002. - 59 с.
80. Рекунов С.С. Об оценке надёжности и восстановлении эксплуатационных качеств мостовых сооружений [Электронный ресурс] / С.С. Рекунов // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». -2016. - №2. – Режим доступа: <http://t-s.today/PDF/07TS216.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
81. Рябинин И.А. Надёжность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. - СПб.: Политехника, 2000. - 247с.
82. Рябинин И.А., Струков А.В. Автоматизированное моделирование надёжности структурно-сложных систем из элементов с тремя несовместными состояниями / И.А. Рябинин, А.В. Струков // Труды СПИИРАН. - 2014. - Вып. 3(34). - С. 89-111.
83. Рябинин И.А., Струков А.В. Предисловие и вступительная статья к переизданию работы П.С.Порецкого «Решение общей задачи теории вероятностей при помощи математической логики» / И.А. Рябинин, А.В. Струков // Труды СПИИРАН. - 2015. - Вып. 6(43). - С. 5-26.
84. Савченко В. Н. Показатели надёжности пассивно-резервированных технических систем / В. Н. Савченко // Отраслевые аспекты технических наук. - 2013. - № 4 (28). - С. 18-23.
85. Северцев Н. А. Надёжность сложных систем в эксплуатации и отработке / Н. А. Северцев. М.: Высшая школа, 1989.
86. Семенов С.С., Полтавский А.В., Маклаков В.В., Крянев А.В. Обзор методов принятия решений при разработке сложных технических систем / С.С. Семенов, А.В. Полтавский, В.В. Маклаков, А.В. Крянев // Надёжность. – 2014. № 3. - С. 72-96.
87. Слышалов В.К. Основы расчета надёжности систем электроснабжения / В.К. Слышалов. – Иваново, 2012. - 80 с.

88. Сороколетов Е.П., Войнов К.Н. Исследование поведения центра тяжести плотности распределения времени безотказной работы сложных технических систем при резервировании / Е.П. Сороколетов, К.Н. Войнов // Надежность. – 2016. - № 16(4). - С. 3-10.
89. Справочник по надежности и эффективности в технике/ [под ред. В.И. Патрушева и А.И. Рембезы]. – М.: Машиностроение, 1988. - 38 с.
90. Струков А.В., Ветлугин К.А. О методах количественного анализа кибербезопасности технических систем на основе логико-вероятностного подхода [Электронный ресурс] / А.В. Струков, К.А. Ветлугин // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2017. - № 4. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
91. Сучака Е. В., Василенко Н. В. Надежность технических систем / Е. В. Сучака, Н. В. Василенко. - Красноярск: МГП "Раско", 2001. - 600 с.
92. Сугак Е.В., Кучкин А.Г., Окладникова Е.Н. Надежность технических систем и техногенный риск / Е.В. Сугак, А.Г. Кучкин, Е.Н. Окладникова. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. - Красноярск, 2011.
93. Толстов А.С., Пантюхов Д.В. Подход к обеспечению требований к безотказности сложных систем на основе параметрической оптимизации схем надёжности / А.С. Толстов, Д.В. Пантюхов // Надежность. – 2016. - №16(2). - С. 26-30.
94. Третьяков А.М. Основы теории надежности / А.М. Третьяков. - Бийск: Изд-во Алтайского гос. техн. университета, 2016. - С. 83.
95. Трифанов И.В., Жирнова Е.А. Надежность технических систем : метод. указания к практ. работам для студентов магистратуры по направлению подготовки 27.04.01 «Стандартизация и метрология» всех форм обучения / И.В. Трифанов, Е.А. Жирнова. - Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева., 2018. - 68 с.

96. Федухин А.В., Пасько В.П. Моделирование надежности систем / А.В. Федухин, В.П. Пасько // Методы менеджмента качества. - 2012. - № 3. - С. 50-55.
97. Федухин А.В., Пасько В.П. Моделирование надежности восстанавливаемой квазимостиковой структуры с учетом тренда параметров надежности составных частей / А.В. Федухин, В.П. Пасько // Математичні машини і системи. -2014. - № 3. - С. 125-135.
98. Федухин А.В., Пасько В.П., Муха А.А. К вопросу моделирования надежности восстанавливаемой квазимостиковой структуры с учетом тренда параметров надежности составных частей / А.В. Федухин, В.П. Пасько, А.А. Муха // Математичні машини і системи. - 2016. - № 1. - С. 158-167.
99. Федухин А.В., Пасько В.П. К вопросу о моделирования надежности двухканального невосстанавливаемого вычислительного комплекса специального назначения / А.В. Федухин, В.П. Пасько // Математичні машини і системи. - 2016. - № 4. - С. 142-145.
100. Филиппов Б.И., Труш Т.Б. Обработка данных, полученных при испытаниях на надежность / Б.И. Филиппов, Т.Б. Труш // Надежность. - 2017. - № 17(2). - С. 24-30.
101. Харисов Г.Х., Бирюков Р.Н., Сидоренко Г.Г., Мирзаянц А.В. Надежность технических систем и техногенный риск / Г.Х. Харисов, Р.Н. Бирюков, Г.Г. Сидоренко, А.В. Мирзаянц. - М.: Академии ГПС МЧС России, 2012. - 167 с.
102. Харлап С.Н., Сивко Б.В. Разработка высоконадежных систем на основе метода взаимной проверки аксиоматических базисов / С.Н. Харлап, Б.В. Сивко // Надежность. - 2016. - № 16(1). - С. 66-76.
103. Хахулин Г.Ф., Титов Ю.П. Имитационная модель надежности структуры летательных аппаратов военного назначения и ее использование в задачах исследования процессов их послепродажного обслуживания / Г.Ф. Хахулин, Ю.П. Титов // Надежность. – 2014. - № 3. - С. 3-26.

104. Целищев В.А. Основы теории надежности / В.А. Целищев. - Иркутск, 2015. - 43 с.
105. Цкляр В.Н. Надёжность систем управления / В.Н. Цкляр. - Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. - 126 с.
106. Чебоксаров А.Н. Основы теории надежности и диагностика: курс лекций / А.Н. Чебоксаров. - Омск: СибАДИ, 2012. - 76 с.
107. Черняк М.Ю., Эльберг М.С., Сергеева Е.В. Математические методы теории надежности: практикум. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т / М.Ю.Черняк, М.С. Эльберг, Е.В. Сергеева. - Красноярск, 2014. - Ч.1.
108. Черняк М.Ю., Эльберг М.С., Сергеева Е.В. Надежность невосстанавливаемых и восстанавливаемых нерезервированных систем / М.Ю. Черняк, М.С. Эльберг, Е.В. Сергеева. - Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2015. - 112 с.
109. Шишмарев В.Ю. Надежность технических систем: учебник для студ. высш. учеб. Заведений / В.Ю. Шишмарев. - М.: Издательский центр «Академия», 2010. - 304с.
110. Шубин, Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск: учебное пособие / Р.А. Шубин. - Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. - 80 с.
111. Ямпурин Н.П., Баранова А.В. Основы надежности электронных средств: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений; под ред. Н.П. Ямпурин / Н.П. Ямпурин, А.В. Баранова. - М.: Издательский центр «Академия», 2010. - 240 с.
112. Mostafa Sadeghi , Hossein Soltani, Mohamadreza Khayyambashi. The study of hardware redundancy techniques to provide a fault tolerant system / Mostafa Sadeghi, Hossein Soltani, Mohamadreza Khayyambashi // Cumhuriyet University Faculty of Science Science Journal (CSJ). - 2015. - № 4. - С. 236-245.
113. James Y.Lee, George J.Collins. On Using Ilities of Non-Functional Properties for Subsystems and Components / James Y.Lee, George J.Collins// Systems. - 2017. doi:10.3390/systems5030047.

114. Vu Trong Tuan. Specific features of research and development of the passive redundant subsystems of the aircraft with due consideration of tolerances / Vyacheslav M. Grishin, Vu Trong Tuan // Journal of Mechanical Engineering Research & developments (JMERD). - 2018. - № 41(4). - C. 82-87.
115. Vu Trong Tuan. Analysis of the Failure-Free operation of the passive redundant subsystems of the aircraft with due consideration of the tolerances / Vyacheslav M. Grishin, Vu Trong Tuan // Journal of Mechanical Engineering Research & developments (JMERD). - 2018. - № 41(4). - C. 96-103.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица ПА.1 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от K_i^n p и допуска первого уровня $dW_p=50\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,470	0,500	0,550	0,600	0,650	0,700	0,750
50,0	$K_1^n=2$	0,719	0,750	0,797	0,840	0,877	0,910	0,937
	$K_2^n=4/2$	0,641	0,687	0,758	0,821	0,873	0,916	0,949
	$K_3^n=6/3$	0,598	0,656	0,745	0,821	0,883	0,929	0,962
	$K_4^n=8/4$	0,569	0,637	0,740	0,826	0,894	0,942	0,973
	$K_5^n=10/5$	0,547	0,623	0,738	0,834	0,905	0,953	0,980
	$K_6^n=12/6$	0,530	0,613	0,739	0,842	0,915	0,961	0,986
	$K_7^n=14/7$	0,515	0,605	0,741	0,850	0,925	0,968	0,990
	$K_8^n=16/8$	0,502	0,598	0,744	0,858	0,933	0,974	0,992
	$K_9^n=18/9$	0,491	0,593	0,747	0,865	0,940	0,979	0,995
	$K_{10}^n=20/10$	0,480	0,588	0,751	0,872	0,947	0,983	0,996

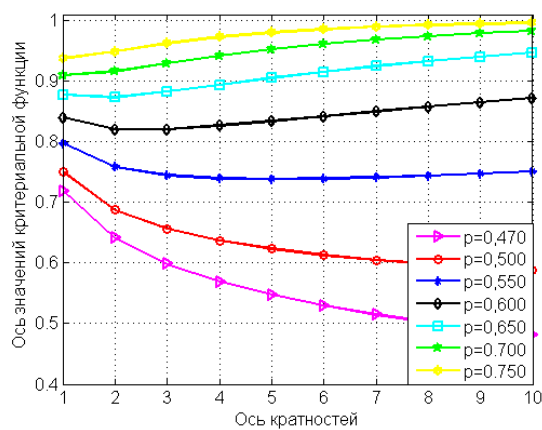


Рисунок ПА.1 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p=50\%$

Таблица ПА.2 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от $K_i^и$ p и допуска первого уровня $dW_p = 33,3\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,691	0,725	0,750	0,775	0,800	0,825	0,850
33,3	$K_1^и = 3/2$	0,773	0,815	0,844	0,871	0,896	0,919	0,939
	$K_2^и = 6/4$	0,727	0,789	0,831	0,868	0,901	0,929	0,953
	$K_3^и = 9/6$	0,709	0,785	0,834	0,878	0,914	0,944	0,966
	$K_4^и = 12/8$	0,700	0,787	0,842	0,890	0,927	0,956	0,976
	$K_5^и = 15/10$	0,695	0,791	0,852	0,901	0,939	0,966	0,983
	$K_6^и = 18/12$	0,692	0,797	0,861	0,912	0,949	0,973	0,988
	$K_7^и = 21/14$	0,691	0,803	0,87	0,921	0,957	0,979	0,992
	$K_8^и = 24/16$	0,691	0,810	0,879	0,930	0,964	0,984	0,994
	$K_9^и = 27/18$	0,692	0,816	0,887	0,937	0,970	0,987	0,996
	$K_{10}^и = 30/20$	0,693	0,823	0,894	0,944	0,974	0,990	0,997

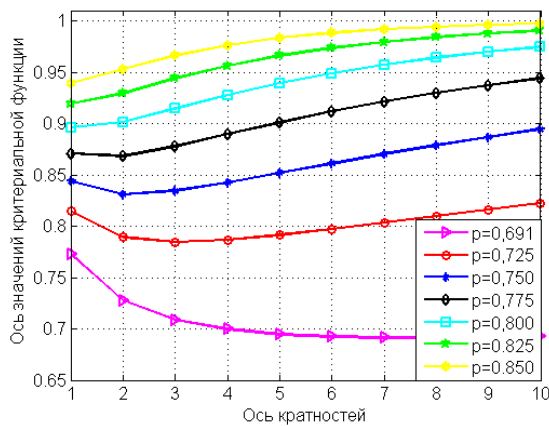


Рисунок ПА.2 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p = 33,3\%$

Таблица ПА.3 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от $K_i^И$ p и допуска первого уровня $dW_p = 25\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,796	0,815	0,830	0,845	0,860	0,875	0,890
25,0	$K_1^И = 4/3$	0,813	0,842	0,863	0,884	0,903	0,921	0,938
	$K_2^И = 8/6$	0,788	0,829	0,859	0,886	0,911	0,933	0,951
	$K_3^И = 12/9$	0,784	0,833	0,868	0,898	0,925	0,947	0,965
	$K_4^И = 16/12$	0,786	0,841	0,879	0,911	0,938	0,959	0,975
	$K_5^И = 20/15$	0,791	0,850	0,890	0,923	0,949	0,969	0,982
	$K_6^И = 24/18$	0,797	0,860	0,901	0,934	0,959	0,976	0,988
	$K_7^И = 28/21$	0,803	0,869	0,911	0,943	0,966	0,982	0,991
	$K_8^И = 32/24$	0,810	0,878	0,919	0,950	0,972	0,986	0,994
	$K_9^И = 36/27$	0,816	0,886	0,927	0,957	0,977	0,989	0,996
	$K_{10}^И = 40/30$	0,823	0,893	0,934	0,963	0,981	0,992	0,997

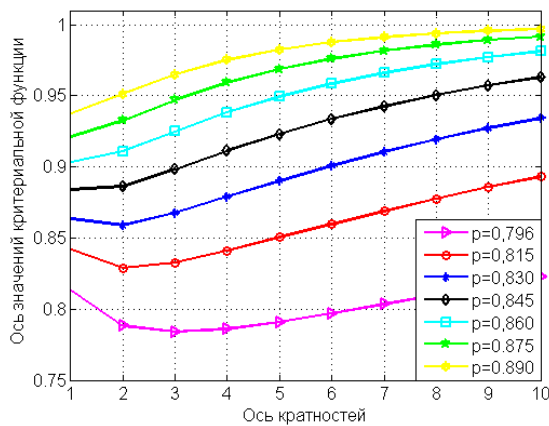


Рисунок ПА.3 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных $p, dW_p = 25\%$

Таблица ПА.4 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от $K_i^и$ p и допуска первого уровня $dW_p=20\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,871	0,880	0,890	0,900	0,910	0,920	0,930
20,0	$K_1^и=5/4$	0,873	0,888	0,903	0,919	0,933	0,946	0,958
	$K_2^и=10/8$	0,872	0,891	0,912	0,930	0,946	0,96	0,972
	$K_3^и=15/12$	0,882	0,904	0,926	0,944	0,96	0,973	0,982
	$K_4^и=20/16$	0,894	0,917	0,939	0,957	0,971	0,982	0,989
	$K_5^и=25/20$	0,906	0,929	0,95	0,967	0,979	0,988	0,993
	$K_6^и=30/24$	0,917	0,939	0,959	0,974	0,985	0,992	0,996
	$K_7^и=35/28$	0,926	0,948	0,967	0,980	0,989	0,994	0,998
	$K_8^и=40/32$	0,935	0,956	0,973	0,985	0,992	0,996	0,998
	$K_9^и=45/36$	0,942	0,962	0,978	0,988	0,994	0,997	0,999
	$K_{10}^и=50/40$	0,949	0,968	0,982	0,991	0,996	0,998	0,999

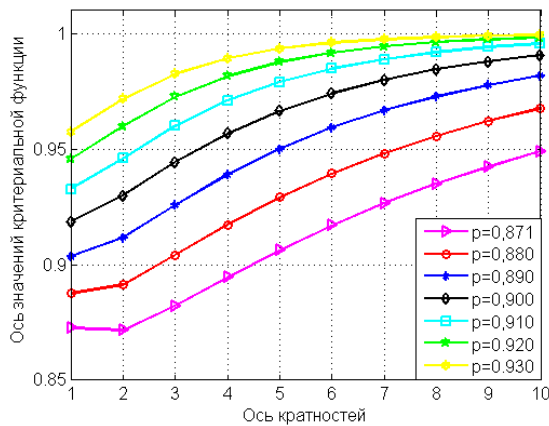


Рисунок ПА.4 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p=20\%$

Таблица ПА.5 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от $K_i^и$ p и допуска первого уровня $dW_p=16,7\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,917	0,925	0,930	0,935	0,940	0,945	0,950
16,7	$K_1^и=6/5$	0,917	0,931	0,939	0,947	0,954	0,961	0,967
	$K_2^и=12/10$	0,929	0,944	0,953	0,961	0,968	0,975	0,98
	$K_3^и=18/15$	0,943	0,959	0,967	0,974	0,980	0,985	0,989
	$K_4^и=24/20$	0,956	0,970	0,977	0,983	0,987	0,991	0,994
	$K_5^и=30/25$	0,966	0,978	0,984	0,988	0,992	0,995	0,997
	$K_6^и=36/30$	0,973	0,984	0,989	0,992	0,995	0,997	0,998
	$K_7^и=42/35$	0,979	0,988	0,992	0,995	0,997	0,998	0,999
	$K_8^и=48/40$	0,984	0,991	0,994	0,997	0,998	0,999	0,999
	$K_9^и=54/45$	0,987	0,994	0,996	0,998	0,999	0,999	1,000
	$K_{10}^и=60/50$	0,990	0,995	0,997	0,998	0,999	1,000	1,000

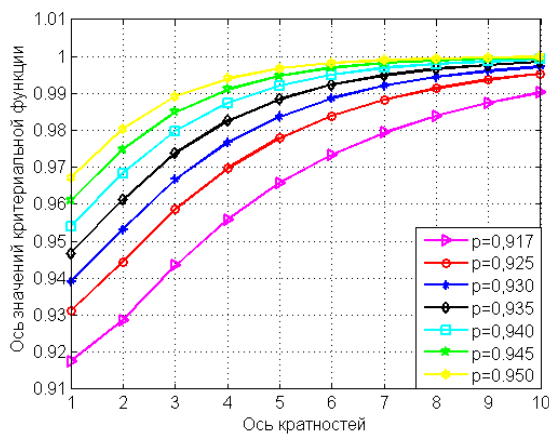


Рисунок ПА.5 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p=16,7\%$

Таблица ПА.6 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от K_i^n p и допуска первого уровня $dW_p=14,3\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,943	0,947	0,951	0,955	0,959	0,963	0,967
14,3	$K_1^n=7/6$	0,944	0,951	0,957	0,963	0,969	0,975	0,980
	$K_2^n=14/12$	0,958	0,965	0,971	0,977	0,982	0,986	0,990
	$K_3^n=21/18$	0,971	0,977	0,982	0,987	0,990	0,993	0,995
	$K_4^n=28/24$	0,980	0,985	0,989	0,992	0,995	0,997	0,998
	$K_5^n=35/30$	0,987	0,990	0,993	0,996	0,997	0,998	0,999
	$K_6^n=42/36$	0,991	0,994	0,996	0,997	0,999	0,999	1,000
	$K_7^n=49/42$	0,994	0,996	0,998	0,999	0,999	1,000	1,000
	$K_8^n=56/48$	0,996	0,997	0,998	0,999	1,000	1,000	1,000
	$K_9^n=63/54$	0,997	0,998	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_{10}^n=70/60$	0,998	0,999	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000

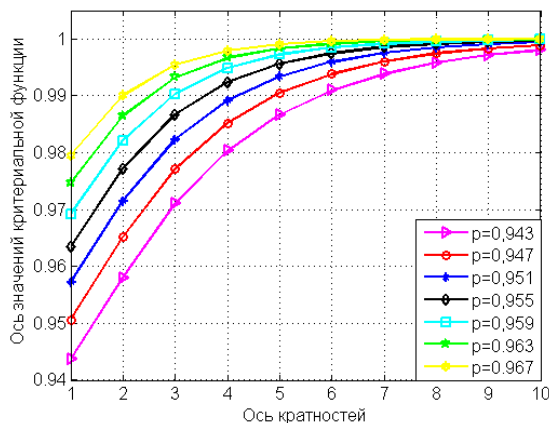


Рисунок ПА.6 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i^n для разных p , $dW_p=14,3\%$

Таблица ПА.7 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от K_i^n p и допуска первого уровня $dW_p = 12,5\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,958	0,960	0,962	0,964	0,966	0,968	0,970
12,5	$K_1^n = 8/7$	0,958	0,962	0,965	0,969	0,972	0,975	0,978
	$K_2^n = 16/14$	0,972	0,976	0,979	0,982	0,984	0,987	0,989
	$K_3^n = 24/21$	0,983	0,986	0,988	0,990	0,992	0,993	0,995
	$K_4^n = 32/28$	0,990	0,992	0,993	0,995	0,996	0,997	0,998
	$K_5^n = 40/35$	0,994	0,995	0,996	0,997	0,998	0,998	0,999
	$K_6^n = 48/42$	0,996	0,997	0,998	0,998	0,999	0,999	0,999
	$K_7^n = 56/49$	0,998	0,998	0,999	0,999	0,999	1,000	1,000
	$K_8^n = 64/56$	0,999	0,999	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_9^n = 72/63$	0,999	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_{10}^n = 80/70$	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

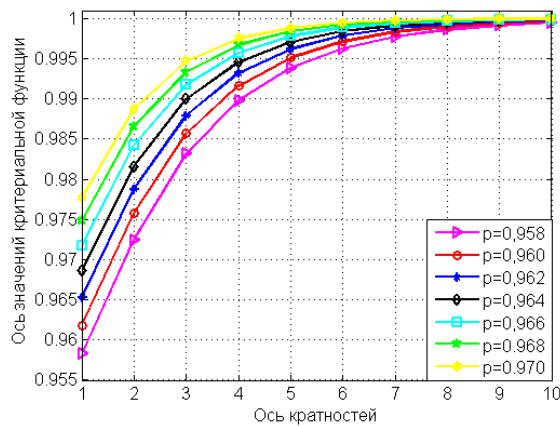


Рисунок ПА.7 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i^n для разных p , $dW_p = 12,5\%$

Таблица ПА.8 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от K_i^n p и допуска первого уровня $dW_p = 11,1\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,968	0,970	0,972	0,974	0,976	0,978	0,980
11,1	$K_1^n = 9/8$	0,968	0,972	0,975	0,978	0,981	0,984	0,987
	$K_2^n = 18/16$	0,981	0,984	0,987	0,989	0,991	0,993	0,995
	$K_3^n = 27/24$	0,99	0,992	0,994	0,995	0,996	0,997	0,998
	$K_4^n = 36/32$	0,994	0,996	0,997	0,998	0,998	0,999	0,999
	$K_5^n = 45/40$	0,997	0,998	0,998	0,999	0,999	1,000	1,000
	$K_6^n = 54/48$	0,998	0,999	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_7^n = 63/56$	0,999	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_8^n = 72/64$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_9^n = 81/72$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_{10}^n = 90/80$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

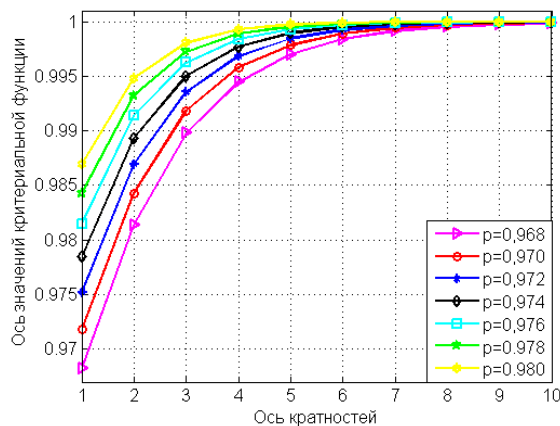


Рисунок ПА.8 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p = 11,1\%$

Таблица ПА.9 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от $K_i^и$ p и допуска первого уровня $dW_p = 10\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,975	0,978	0,981	0,984	0,987	0,990	0,993
10,0	$K_1^и = 10/9$	0,975	0,981	0,985	0,989	0,993	0,996	0,998
	$K_2^и = 20/18$	0,987	0,991	0,994	0,996	0,998	0,999	1,000
	$K_3^и = 30/27$	0,994	0,996	0,998	0,999	0,999	1,000	1,000
	$K_4^и = 40/36$	0,997	0,998	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_5^и = 50/45$	0,998	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_6^и = 60/54$	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_7^и = 70/63$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_8^и = 80/72$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_9^и = 90/81$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_{10}^и = 100/90$	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

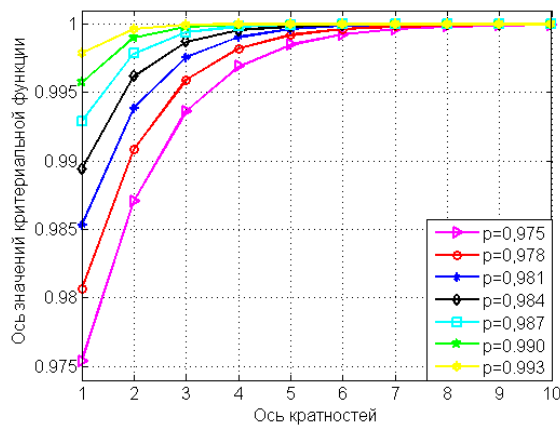


Рисунок ПА.9 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p = 10\%$

Таблица ПА.10 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от $K_i^И$, p и допуска второго уровня $dW_p=66,7\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,269	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800
66,7	$K_2^И=3$	0,609	0,657	0,784	0,875	0,936	0,973	0,992
	$K_3^И=6/2$	0,511	0,580	0,767	0,891	0,959	0,989	0,998
	$K_4^И=9/3$	0,452	0,537	0,768	0,910	0,975	0,996	1,000
	$K_5^И=12/4$	0,411	0,507	0,775	0,927	0,985	0,998	1,000
	$K_6^И=15/5$	0,378	0,485	0,783	0,941	0,991	0,999	1,000
	$K_7^И=18/6$	0,350	0,466	0,791	0,952	0,994	1,000	1,000
	$K_8^И=21/7$	0,327	0,449	0,800	0,961	0,996	1,000	1,000
	$K_9^И=24/8$	0,306	0,435	0,808	0,968	0,998	1,000	1,000
	$K_{10}^И=27/9$	0,288	0,423	0,816	0,974	0,999	1,000	1,000
	$K_{11}^И=30/10$	0,271	0,411	0,824	0,979	0,999	1,000	1,000

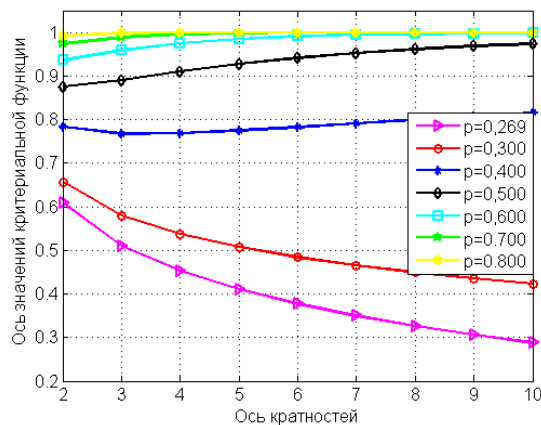


Рисунок ПА.10 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p=66,7\%$

Таблица ПА.11 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от $K_i^И$, p и допуска второго уровня $dW_p=40\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,610	0,650	0,690	0,730	0,770	0,810	0,850
40,0	$K_2^И=5/3$	0,700	0,765	0,823	0,874	0,916	0,949	0,973
	$K_3^И=10/6$	0,658	0,751	0,832	0,896	0,943	0,973	0,990
	$K_4^И=15/9$	0,641	0,755	0,849	0,918	0,963	0,986	0,996
	$K_5^И=20/12$	0,631	0,762	0,866	0,936	0,975	0,993	0,999
	$K_6^И=25/15$	0,626	0,771	0,881	0,950	0,984	0,996	1,000
	$K_7^И=30/18$	0,622	0,780	0,895	0,961	0,989	0,998	1,000
	$K_8^И=35/21$	0,620	0,789	0,907	0,969	0,993	0,999	1,000
	$K_9^И=40/24$	0,619	0,798	0,917	0,975	0,995	0,999	1,000
	$K_{10}^И=45/27$	0,618	0,806	0,926	0,980	0,997	1,000	1,000
	$K_{11}^И=50/30$	0,618	0,814	0,934	0,984	0,998	1,000	1,000

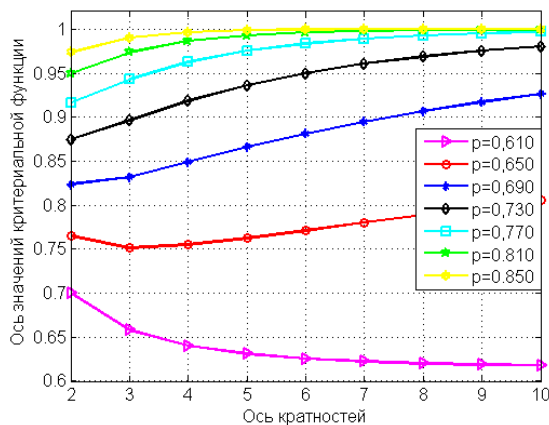


Рисунок ПА.11 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p=40\%$

Таблица ПА.12 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от $K_i^И$, p и допуска второго уровня $dW_p=28,6\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,755	0,780	0,810	0,840	0,870	0,900	0,930
28,6	$K_2^И=7/5$	0,767	0,816	0,869	0,913	0,949	0,974	0,990
	$K_3^И=14/10$	0,756	0,824	0,891	0,941	0,973	0,991	0,998
	$K_4^И=21/15$	0,761	0,840	0,913	0,961	0,986	0,997	1,000
	$K_5^И=28/20$	0,770	0,857	0,931	0,974	0,993	0,999	1,000
	$K_6^И=35/25$	0,780	0,872	0,945	0,983	0,996	1,000	1,000
	$K_7^И=42/30$	0,789	0,885	0,957	0,988	0,998	1,000	1,000
	$K_8^И=49/35$	0,799	0,897	0,965	0,992	0,999	1,000	1,000
	$K_9^И=56/40$	0,808	0,908	0,972	0,995	0,999	1,000	1,000
	$K_{10}^И=63/45$	0,817	0,918	0,978	0,996	1,000	1,000	1,000
	$K_{11}^И=70/50$	0,825	0,926	0,982	0,998	1,000	1,000	1,000

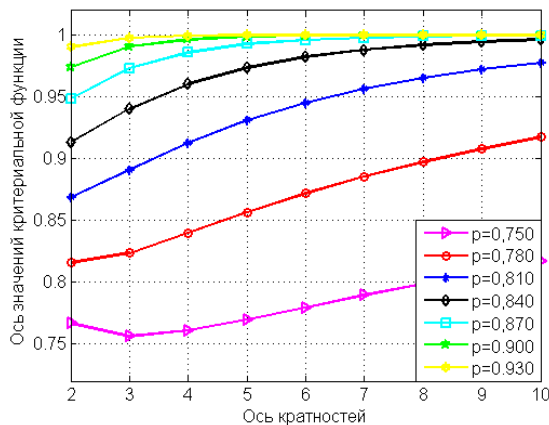


Рисунок ПА.12 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p=28,6\%$

Таблица ПА.13 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от $K_i^И$, p и допуска второго уровня $dW_p=22,2\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,843	0,860	0,880	0,900	0,920	0,940	0,950
22,2	$K_2^И=9/7$	0,844	0,880	0,917	0,947	0,970	0,986	0,992
	$K_3^И=18/14$	0,860	0,904	0,944	0,972	0,988	0,997	0,998
	$K_4^И=27/21$	0,881	0,927	0,964	0,985	0,996	0,999	1,000
	$K_5^И=36/28$	0,900	0,944	0,976	0,992	0,998	1,000	1,000
	$K_6^И=45/35$	0,915	0,957	0,985	0,996	0,999	1,000	1,000
	$K_7^И=54/42$	0,928	0,967	0,990	0,998	1,000	1,000	1,000
	$K_8^И=63/49$	0,939	0,975	0,993	0,999	1,000	1,000	1,000
	$K_9^И=72/56$	0,948	0,980	0,996	0,999	1,000	1,000	1,000
	$K_{10}^И=81/63$	0,956	0,985	0,997	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_{11}^И=90/70$	0,963	0,988	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000

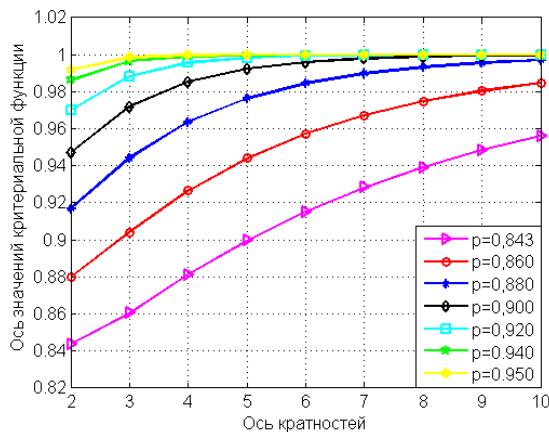


Рисунок ПА.13 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p=22,2\%$

Таблица ПА.14 Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от $K_i^И$, p и допуска второго уровня $dW_p=18,2\%$

dW_p %	Индивид. кратности	Безотказность элементов p						
		0,892	0,900	0,910	0,920	0,930	0,940	0,950
18,2	$K_2^И=11/9$	0,893	0,910	0,931	0,948	0,963	0,975	0,985
	$K_3^И=22/18$	0,919	0,938	0,958	0,973	0,984	0,991	0,996
	$K_4^И=33/27$	0,941	0,958	0,975	0,986	0,993	0,997	0,999
	$K_5^И=44/36$	0,957	0,972	0,985	0,993	0,997	0,999	1,000
	$K_6^И=55/45$	0,969	0,981	0,991	0,996	0,999	1,000	1,000
	$K_7^И=66/54$	0,977	0,987	0,995	0,998	0,999	1,000	1,000
	$K_8^И=77/63$	0,983	0,991	0,997	0,999	1,000	1,000	1,000
	$K_9^И=88/72$	0,988	0,994	0,998	0,999	1,000	1,000	1,000
	$K_{10}^И=99/81$	0,991	0,996	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000
	$K_{11}^И=110/90$	0,993	0,997	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000

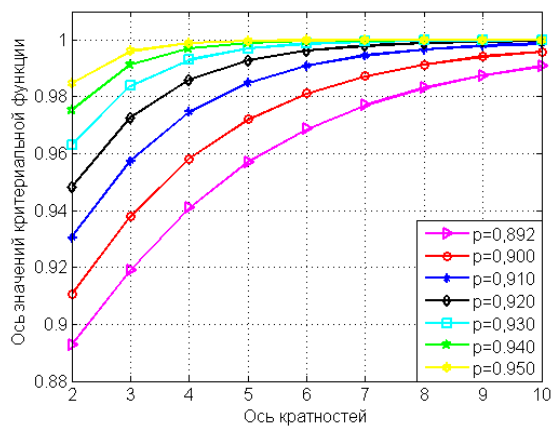


Рисунок ПА.14 Графики зависимостей P_c от обобщенных кратностей K_i для разных p , $dW_p=18,2\%$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

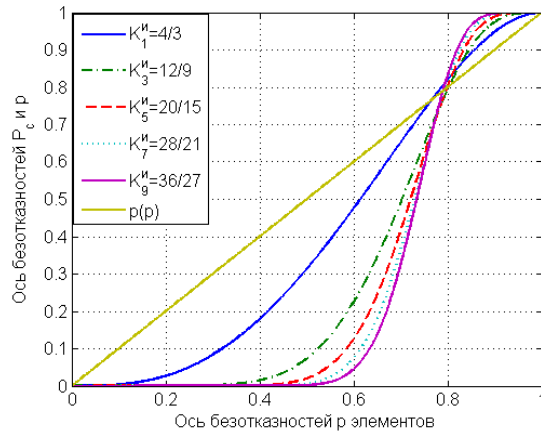


Рисунок ПБ. 1 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, $dW_p = 25\%$

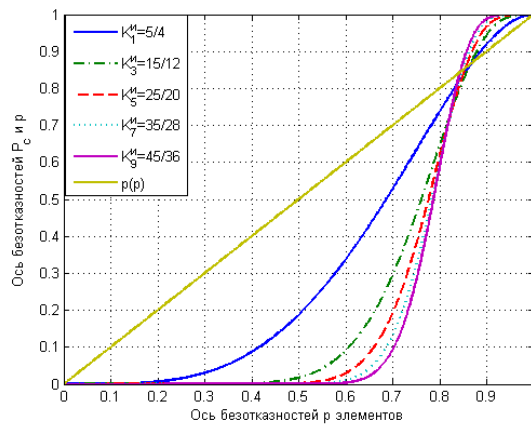


Рисунок ПБ. 2 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, $dW_p = 20\%$

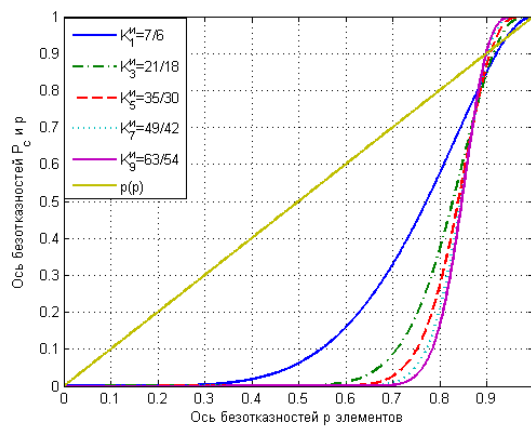


Рисунок ПБ. 3 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, $dW_p = 14,3\%$

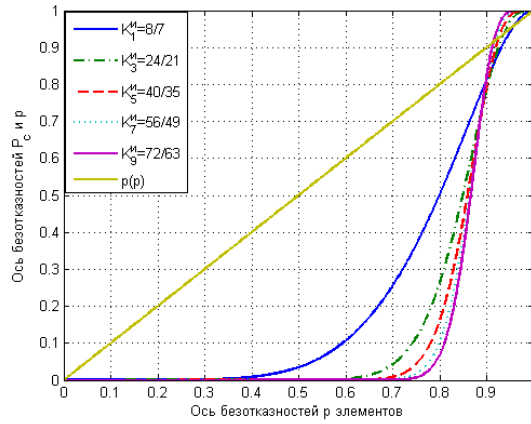


Рисунок ПБ. 4 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, $dW_p = 12,5\%$

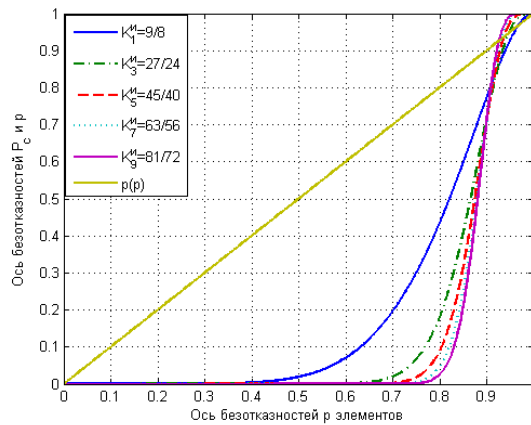


Рисунок ПБ. 5 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, $dW_p = 11,1\%$

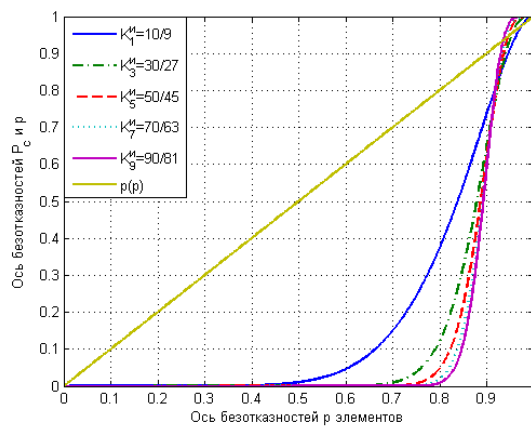


Рисунок ПБ. 6 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, $dW_p = 10\%$

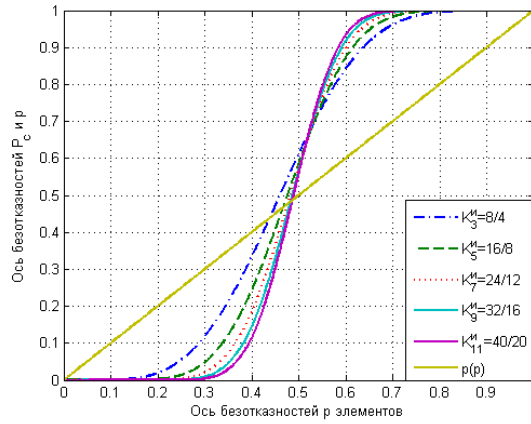


Рисунок ПБ. 7 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, допуска $dW_p = 50\%$ 2-го уровня

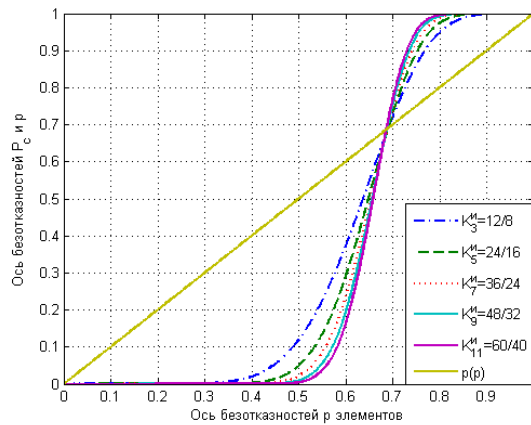


Рисунок ПБ. 8 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, допуска $dW_p = 33,3\%$ 2-го уровня

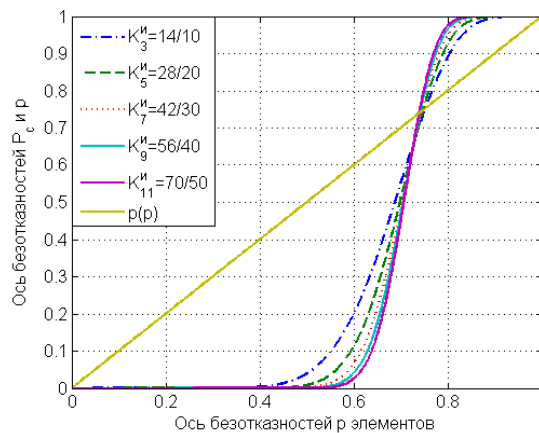


Рисунок ПБ. 9 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, допуска $dW_p = 28,6\%$ 2-го уровня

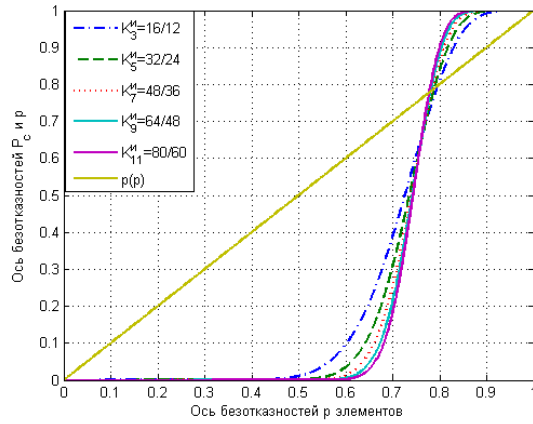


Рисунок ПБ. 10 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, допуска $dW_p = 25\%$ 2-го уровня

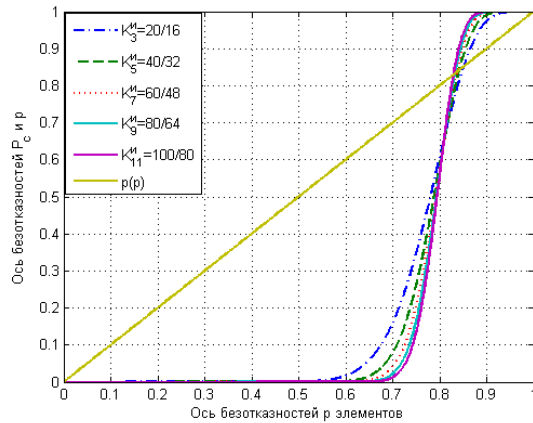


Рисунок ПБ. 11 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, допуска $dW_p = 20\%$ 2-го уровня

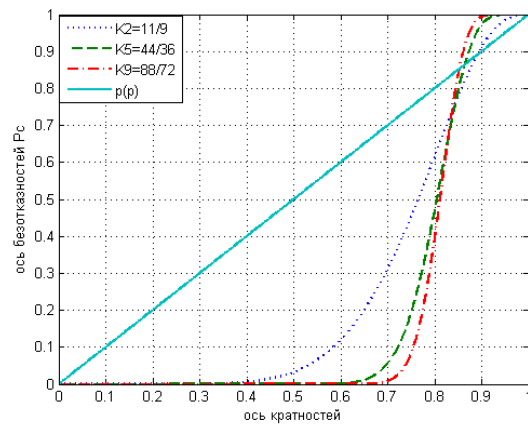


Рисунок ПБ. 12 Графики зависимостей $P_c(p)$ и $p(p)$ для различных индивидуальных кратностей, допуска $dW_p = 18,6\%$ 2-го уровня

ПРИЛОЖЕНИЕ В

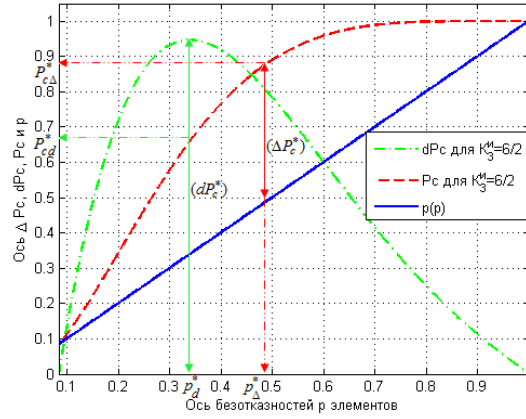


Рисунок ПВ. 1 Зависимости $\Delta P_c(p)$, $dP_c(p)$ и значения $\Delta P_c^*(K_2^И)$, $P_{c\Delta}^*(K_2^И)$, $p_{\Delta}^*(K_2^И)$, $dP_c^*(K_2^И)$, $P_{cd}^*(K_2^И)$, $p_d^*(K_2^И)$, $dW_p = 66,7\%$

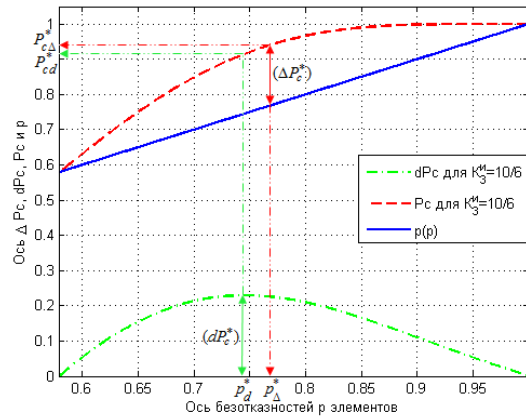


Рисунок ПВ. 2 Зависимости $\Delta P_c(p)$, $dP_c(p)$ и значения $\Delta P_c^*(K_2^И)$, $P_{c\Delta}^*(K_2^И)$, $p_{\Delta}^*(K_2^И)$, $dP_c^*(K_2^И)$, $P_{cd}^*(K_2^И)$, $p_d^*(K_2^И)$, $dW_p = 40\%$

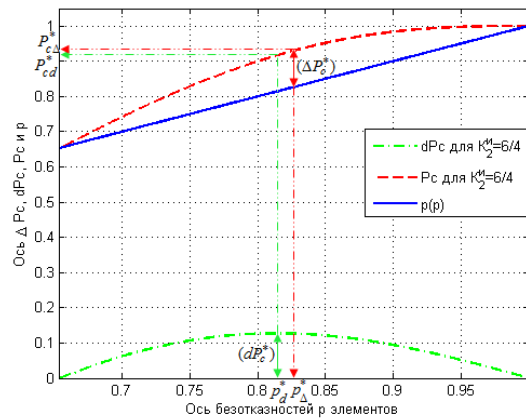


Рисунок ПВ. 3 Зависимости $\Delta P_c(p)$, $dP_c(p)$ и значения $\Delta P_c^*(K_2^И)$, $P_{c\Delta}^*(K_2^И)$, $p_{\Delta}^*(K_2^И)$, $dP_c^*(K_2^И)$, $P_{cd}^*(K_2^И)$, $p_d^*(K_2^И)$, $dW_p = 33,3\%$

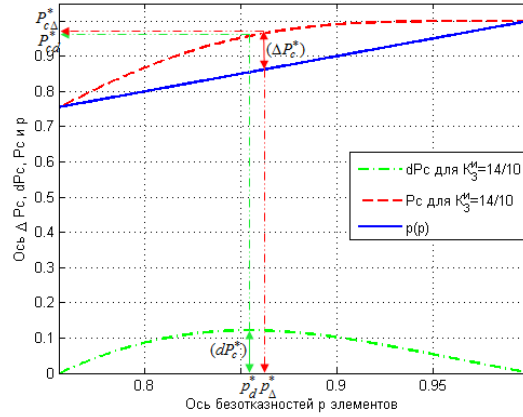


Рисунок ПВ. 4 Зависимости $\Delta P_c(p)$, $dP_c(p)$ и значения $\Delta P_c^*(K_2^И)$, $P_{c\Delta}^*(K_2^И)$, $p_{\Delta}^*(K_2^И)$, $dP_c^*(K_2^И)$, $P_{cd}^*(K_2^И)$, $p_d^*(K_2^И)$, $dW_p = 28,6\%$

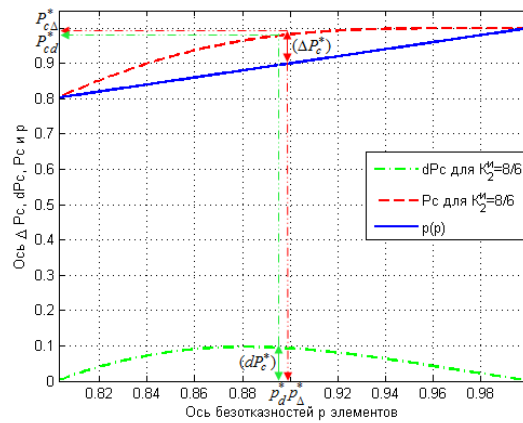


Рисунок ПВ. 5 Зависимости $\Delta P_c(p)$, $dP_c(p)$ и значения $\Delta P_c^*(K_2^И)$, $P_{c\Delta}^*(K_2^И)$, $p_{\Delta}^*(K_2^И)$, $dP_c^*(K_2^И)$, $P_{cd}^*(K_2^И)$, $p_d^*(K_2^И)$, $dW_p = 25\%$

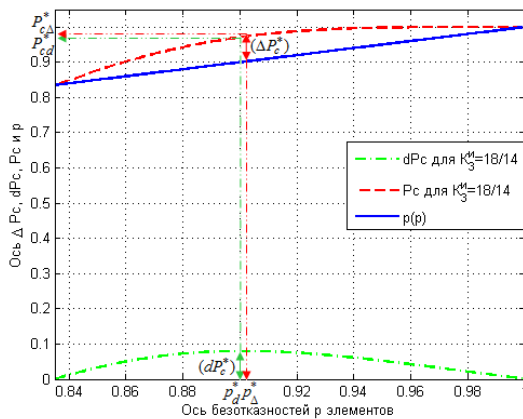


Рисунок ПВ. 6 Зависимости $\Delta P_c(p)$, $dP_c(p)$ и значения $\Delta P_c^*(K_2^И)$, $P_{c\Delta}^*(K_2^И)$, $p_{\Delta}^*(K_2^И)$, $dP_c^*(K_2^И)$, $P_{cd}^*(K_2^И)$, $p_d^*(K_2^И)$, $dW_p = 22,2\%$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

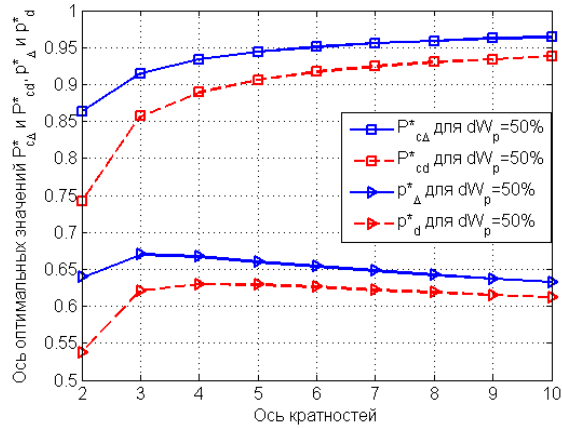


Рисунок ПГ. 1 Графики сравнение зависимостей $P_{c\Delta}^*$ и P_{cd}^* , r_{Δ}^* и r_d^* для допуска $dW_p=50\%$ 2-го уровня

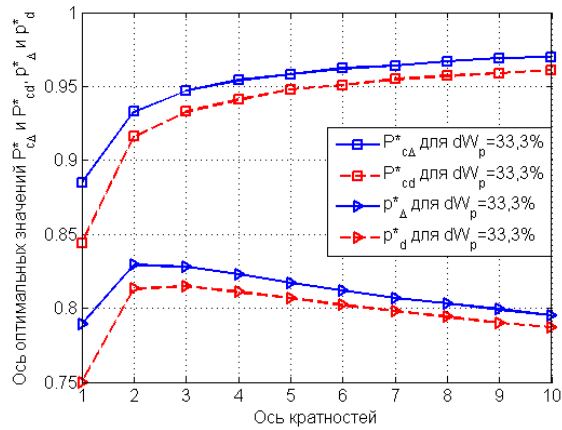


Рисунок ПГ. 2 Графики сравнение зависимостей $P_{c\Delta}^*$ и P_{cd}^* , r_{Δ}^* и r_d^* для допуски $dW_p=33,3\%$ 1-го уровня

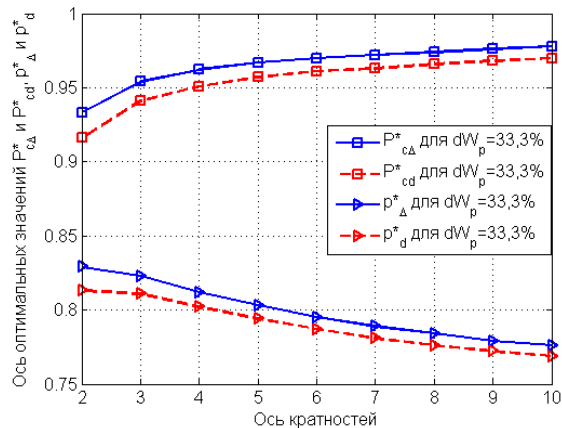


Рисунок ПГ. 3 Графики сравнение зависимостей $P_{c\Delta}^*$ и P_{cd}^* , r_{Δ}^* и r_d^* для допуски $dW_p=33,3\%$ 2-го уровня

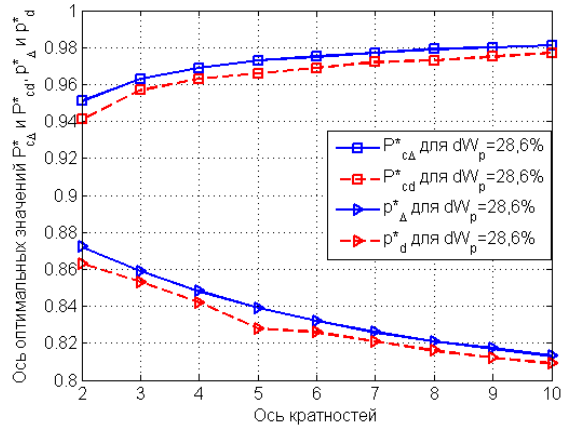


Рисунок ПГ. 4 Графики сравнение зависимостей $P_{сд}^*$ и $P_{сд}^*$, $P_{д}^*$ и $P_{д}^*$ для допуска $dW_p = 28,6\%$ 2-го уровня

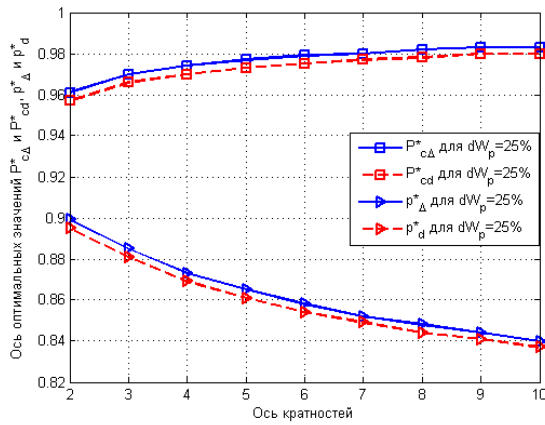


Рисунок ПГ. 5 Графики сравнение зависимостей $P_{сд}^*$ и $P_{сд}^*$, $P_{д}^*$ и $P_{д}^*$ для допуска $dW_p = 25\%$ 2-го уровня

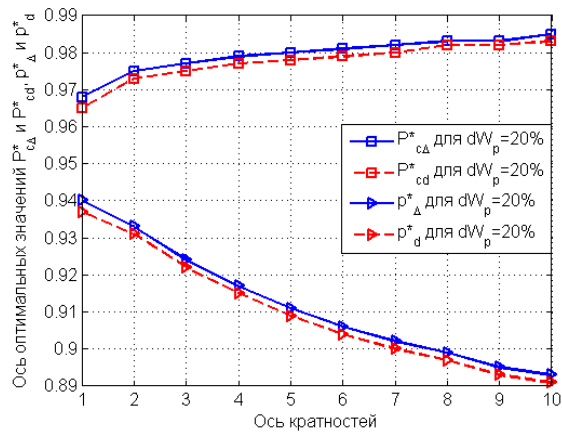


Рисунок ПГ. 6 Графики сравнение зависимостей $P_{сд}^*$ и $P_{сд}^*$, $P_{д}^*$ и $P_{д}^*$ для допуска $dW_p = 20\%$ 1-го уровня

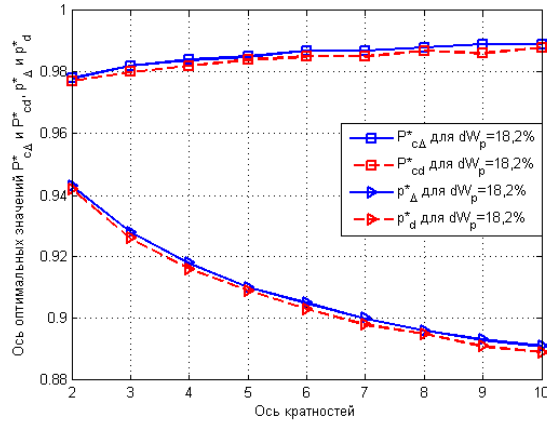


Рисунок ПГ. 7 Графики сравнение зависимостей $P_{сΔ}^*$ и $P_{сd}^*$, $P_{Δ}^*$ и P_d^* для допуска $dW_p = 18,2\%$

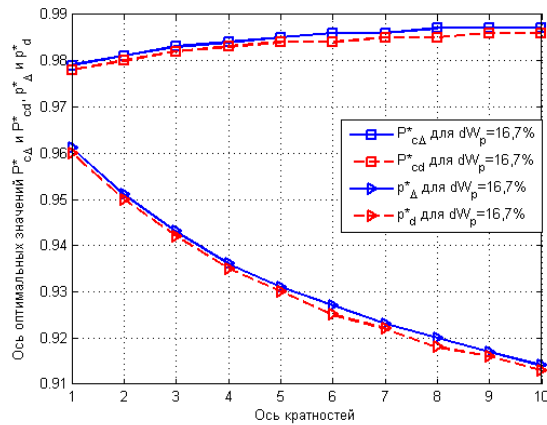


Рисунок ПГ. 8 Графики сравнение зависимостей $P_{сΔ}^*$ и $P_{сd}^*$, $P_{Δ}^*$ и P_d^* для допуска $dW_p = 16,7\%$

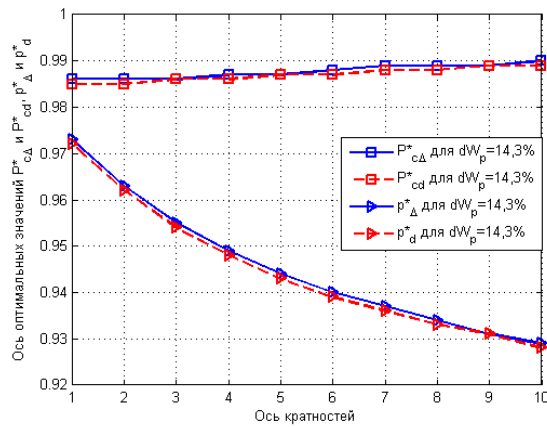


Рисунок ПГ. 9 Графики сравнение зависимостей $P_{сΔ}^*$ и $P_{сd}^*$, $P_{Δ}^*$ и P_d^* для допуска $dW_p = 14,3\%$

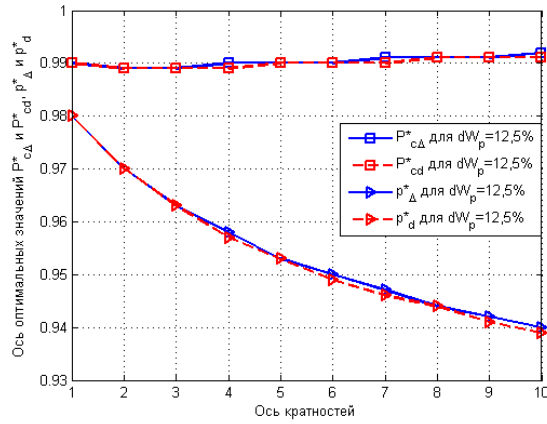


Рисунок ПГ. 10 Графики сравнение зависимостей $P_{сд}^*$ и $P_{сд}^*$, $P_{д}^*$ и $P_{д}^*$ для допуски $dW_p=12,2\%$

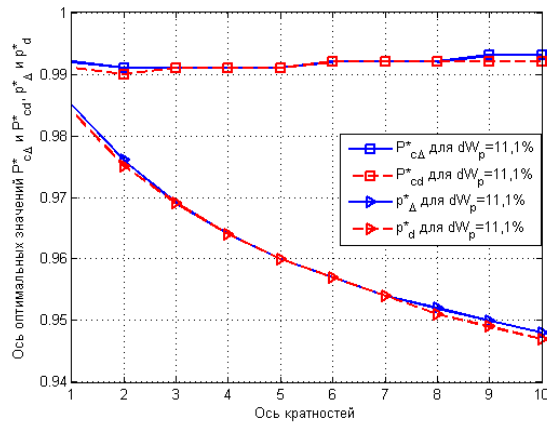


Рисунок ПГ. 11 Графики сравнение зависимостей $P_{сд}^*$ и $P_{сд}^*$, $P_{д}^*$ и $P_{д}^*$ для допуски $dW_p=11,1\%$

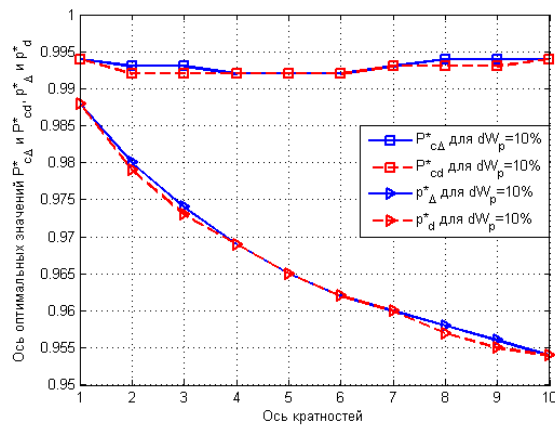


Рисунок ПГ. 12 Графики сравнение зависимостей $P_{сд}^*$ и $P_{сд}^*$, $P_{д}^*$ и $P_{д}^*$ для допуски $dW_p=10\%$