

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)»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Гришин Вячеслав Михайлович**  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Системный анализ и управление», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ).

Официальные оппоненты: **Куршин Владимир Викторович**  
доктор технических наук, заместитель начальника отделения, АО «Российские космические системы».

**Комаров Иван Демьянович,**  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник отдела АО «ЦНИИмаш».

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов», 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

Защита состоится «29» декабря 2020 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.12, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=118410](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=118410)

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, Ученый совет МАИ.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.12 кандидат технических наук



А.В. Старков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Современный период развития характеризуется разработкой и внедрением сложных систем особенно в области аэрокосмической техники. Однако необходимо отметить, что на данном этапе развития существует противоречие между возрастанием сложности этой техники и возросшей вероятности отказа ее отдельных компонентов. Это приводит к огромным затратам на ремонт, к авариям, связанным с большими экономическими потерями и человеческими жертвами. В связи с этим возрастают требования к обеспечению их безопасности. Поэтому при разработке, испытаниях и эксплуатации такой техники особое значение имеют вопросы повышения и обеспечения их безотказности. Однако, в настоящее время наблюдается недостаточность проработки данного вопроса и отсутствие методологии оптимизации безотказности пассивно резервированных систем.

Работа определяется востребованностью 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 безотказности 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.

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 надежности пассивно-резервированных технических систем. Изучению вопросов, касающихся проблем различных видов резервирования посвящены работы и других авторов: Егоров И.В., Кривопапов Д.М., Юркевич Е.В., Зайко Ю.Г., Искандарова Л.Н., Трахтомиров А.В., Гришин В.М., Пью Маунг Ко.

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 надежности. 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. Это работы Бессонова А.А. и Мороз А.В., Викторовой В.С. и Степанянц А.С., Епифанова А.Д., Половко А.М. и Гурова С.И. 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.

### **Цели и задачи**

**Целью** является разработка методик и моделей для выбора оптимальных параметров структур пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков и требований по безотказности.

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

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

**Научная новизна** результатов диссертационной работы состоит в следующем:

- в выявленных особенностях 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 двухкритериальной 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 некратного 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:** для решения поставленных задач использовались методы математического моделирования, базирующиеся 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 основными средствами 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 синтеза 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** определяется:

- 1) Корректным использованием аппарата теории вероятностей, а также математических моделей безотказности 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 расчетов, полученных разными способами, в частности по двум комплексным критериям;
- 5) Значительным объемом выполненных в работе вычислений, результаты которых являются непротиворечивыми и укладываются в рамки существующих представлений теории вероятностей и теории надежности.

**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.

**Апробация работы:** результаты диссертационной работы докладывались на 23-й международной конференции «Системный анализ и управление» (Крым, Евпатория, 2018), на 27-й международной научно-технической конференции «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).

**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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**Первая глава** содержит постановку задачи, выявление особенностей, которые надо учитывать при исследовании и разработке пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков на отклонение их выходных параметров.

В сложных технических устройствах без резервирования практически никогда не удается достичь высокой надежности, даже если использовать составляющие элементы с высокими показателями надежности (выше 0,99), поэтому для повышения надежности необходимо резервирование.

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 более резервных 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.

Резервирование реализует принцип одного из видов избыточности, а именно – структурной избыточности. Степень структурной избыточности часто оценивают параметром, называемым кратностью резервирования  $K$ . Кратность резервирования может оцениваться по разному. В нашей работе кратность

резервирования определяется как отношение общего числа элементов  $n$  к числу основных  $m$ :

$$K = \frac{n}{m}. \quad (1)$$

Одной из особенностей технических систем является взаимосвязанность их подсистем на любом уровне иерархического членения, так что выходные характеристики одной подсистемы являются входными для другой. Примерами связанных подсистем являются: подсистемы питания борта ЛА постоянным или переменным током – потребители электроэнергии; подсистемы питания топливом – двигатели ЛА; усилители мощности – привода, привода – исполнительные органы контуров управления ЛА и т.д. 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. 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 нашей работе рассматриваются пассивно резервированные подсистемы с учетом допусков.

Следует различать допуски назначенные ( $dW_n$ ) и допуски реализуемые ( $dW_p$ ). Назначенный допуск ( $dW_n$ ) задается на смежную подсистему, связанную с пассивно резервированной подсистемой. Он задается на непрерывной шкале допусков и 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. Реализуемый допуск ( $dW_p$ ) определяется величиной отклонения выходного параметра от номинала пассивно резервированной подсистемы при отказе всех (выходе из строя) ее  $r = n - m$  резервных элементов. Реализуемый допуск имеет дискретный характер, определяемый структурой резервирования. Реализуемый и назначенный допуски могут задаваться в абсолютных и относительных величинах. В диссертационном работе рассчитывается и используется реализуемый допуск в относительных величинах так как он определяется только параметрами структуры:

$$dW_p = \frac{r}{n} \cdot 100\% = \frac{n-m}{n} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Для реализуемых и назначенных допусков должно выполняться условие:

$$dW_n \geq dW_p \quad (3)$$

Составим таблицу реализуемых значений относительных допусков для различных структур пассивного резервирования.



Таблица 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

Будем рассматривать изменение допусков по столбцам. Назовем первый столбец 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. Поэтому наиболее значимыми являются допуски первого и второго уровней. Совместное использование допусков первого и второго уровней обеспечивает более частую сетку реализуемых допусков. Образованная ими сетка неповторяющихся относительных реализуемых допусков в соответствии с таблицей 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.

Необходимыми и достаточными условиями реализации кратного и некратного резервирования являются:

1. Количество основных элементов  $m > 0$  для кратного и  $m > 1$  для некратного резервирования;
2. Общее количество элементов должно быть больше числа основных ( $n > m$ );
3. Любой резервный элемент структуры резервирования может заменить строго определенный основной элемент при кратном резервировании и любой элемент структуры резервирования может заменить любой отказавший при некратном резервировании.

Первая строка таблицы 1 соответствует подсистемам с кратным резервированием. Допуски ниже первой строки этой таблицы соответствуют структурам с некратным резервированием.

Каждый допуск может быть реализован при различных значениях кратностей как кратного, так и некратного 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 как бы появляется третье измерение, так как каждому допуску можно поставить в соответствие свою линейку

возрастающих индивидуальных кратностей  $K_i^n$ . 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.

В общем виде линейки индивидуальных кратностей рассчитываются по формуле:

$$K_i^n = \frac{n_i}{m_i} = \frac{n_m \cdot i}{m_m \cdot i} \quad (4)$$

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.

Для сопоставления показателей безотказности при различных допусках в зависимости от  $K_i^n$  в работе вводится унифицирующий параметр  $K_i$  – обобщенная кратность резервирования. Здесь  $i$  – порядковый номер индивидуальной кратности в последовательности их возрастающих отношений при любых значениях реализуемых допусков.

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  $p$ :

$$P_c = P_c(p, n, m). \quad (5)$$

Для подсистем со структурами кратного резервирования любой кратности функция безотказности  $P_c$  всегда больше функции безотказности нерезервированной подсистемы на открытом интервале:  $0 < p < 1$ .

Как показано в работе Епифанова А.Д. на открытом интервале  $(0 - 1)$  зависимости  $P_c(p, n, m)$  и  $p(p)$  для подсистем с некрatным резервированием имеют одну точку пересечения, а уравнение

$$P_c(p, n, m) = p \quad (6)$$

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  $P_c(p, n, m) < p$ , где пассивное резервирование не выгодно;

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

В таблице 2, 3 представлены результаты расчетов критических значений вероятностей элементов пассивно резервированных подсистем  $p_{kr}$ , для допусков первого, второго уровня.

Таблица 2 Критические значения вероятностей  $p_{kr}$  для 11 обобщенных кратностей, соответствующих 9 реализуемым допускам 1-ого 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	-	0,233	0,348	0,396	0,422	0,438	0,449	0,456	0,462	0,467	0,470
33,3	0,500	0,653	0,679	0,687	0,690	0,691	0,691	0,691	0,691	0,691	0,691
25,0	0,768	0,803	0,804	0,801	0,799	0,796	0,794	0,792	0,790	0,789	0,787
20,0	0,869	0,871	0,865	0,859	0,855	0,851	0,848	0,846	0,844	0,842	0,840
16,7	0,917	0,908	0,900	0,893	0,889	0,885	0,882	0,879	0,877	0,875	0,873
14,3	0,943	0,930	0,921	0,915	0,910	0,907	0,904	0,901	0,899	0,897	0,896
12,5	0,958	0,945	0,936	0,930	0,926	0,922	0,919	0,917	0,915	0,913	0,912
11,1	0,968	0,955	0,947	0,941	0,937	0,934	0,931	0,929	0,927	0,925	0,924
10,0	0,975	0,963	0,955	0,950	0,946	0,943	0,940	0,938	0,936	0,934	0,933

Таблица 3 Критические значения вероятностей  $p_{kr}$  для 10 обобщенных 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

**Вторая глава** посвящена разработке модели, постановке задачи оценки безотказности пассивно резервированных подсистем с учетом допусков и ее решению.

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. Факторами, наиболее сильно влияющими на критерий безотказности подсистем являются: структура резервирования, безотказность элементов резервированной подсистемы, значения их критических вероятностей, назначенный и реализуемый допуски.

Задачи анализа имеет вид

$$P_c = P_c(p, m, n, dW_n, dW_p, p_{kr}), \quad (7)$$

при ограничениях:

$$dW_n \geq dW_p, \quad (8)$$

$$p > p_{kr}, \quad (9)$$

$$m, n > 0, \text{ целые.} \quad (10)$$

Решение поставленной задачи заключается в определении требуемого показателя (7) с учетом ограничений (8) – (10) по заданной структурной схеме надежности (ССН) и известных показателях безотказности ее 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  $n > m$ .

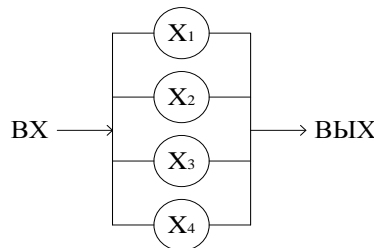


Рисунок 1 Структурная схема надежности  $m = 1$  и  $n = 4$

Показатель безотказности (7) проще вычислить по ССН:

$$P_c = 1 - p^4. \quad (11)$$

ССН подсистем с некратным резервированием в данной задаче реализуются при  $m \geq 2$  и  $n \geq m$ .

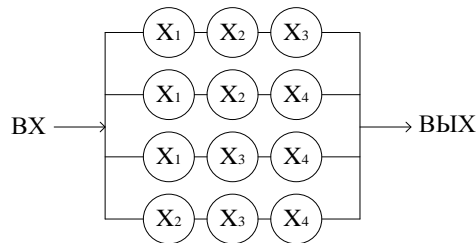


Рисунок 2 Структурная схема надежности  $m = 3$  и  $n = 4$

Показатель безотказности (7) проще вычислить по биномиальному закону:

$$P_c = \sum_{i=m}^n C_n^i p^i (1-p)^{(n-i)}. \quad (12)$$

Исследуем зависимость  $P_c$  от кратностей резервирования для различных значений безотказности элементов и реализуемых допусков пассивно резервированных подсистем в закритической области.

$$P_{krm} = \max_i P_{kr}(K_i^n). \quad (13)$$

Величина  $p_{krm}$  определяет начальные значения варьируемых вероятностей в диапазоне ( $p_{krm}$  – ПГ). ПГ – правая граница диапазона, которая меняется в

зависимости от допуска. 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  $dW_p = 50\%$  и для допусков второго уровня  $dW_p = 66,7\%$  представлены в таблице 4, 5 иллюстрируются графиками на рисунках 3.

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

Таблица 5 Значения безотказности  $P_c$  подсистем в зависимости от  $K_i^H$ ,  $p$  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	$K_2^H = 3$	0,609	0,657	0,784	0,875	0,936	0,973	0,992
	$K_3^H = 6/2$	0,511	0,580	0,767	0,891	0,959	0,989	0,998
	$K_4^H = 9/3$	0,452	0,537	0,768	0,910	0,975	0,996	1,000
	$K_5^H = 12/4$	0,411	0,507	0,775	0,927	0,985	0,998	1,000
	$K_6^H = 15/5$	0,378	0,485	0,783	0,941	0,991	0,999	1,000
	$K_7^H = 18/6$	0,350	0,466	0,791	0,952	0,994	1,000	1,000
	$K_8^H = 21/7$	0,327	0,449	0,800	0,961	0,996	1,000	1,000
	$K_9^H = 24/8$	0,306	0,435	0,808	0,968	0,998	1,000	1,000
	$K_{10}^H = 27/9$	0,288	0,423	0,816	0,974	0,999	1,000	1,000
	$K_{11}^H = 30/10$	0,271	0,411	0,824	0,979	0,999	1,000	1,000

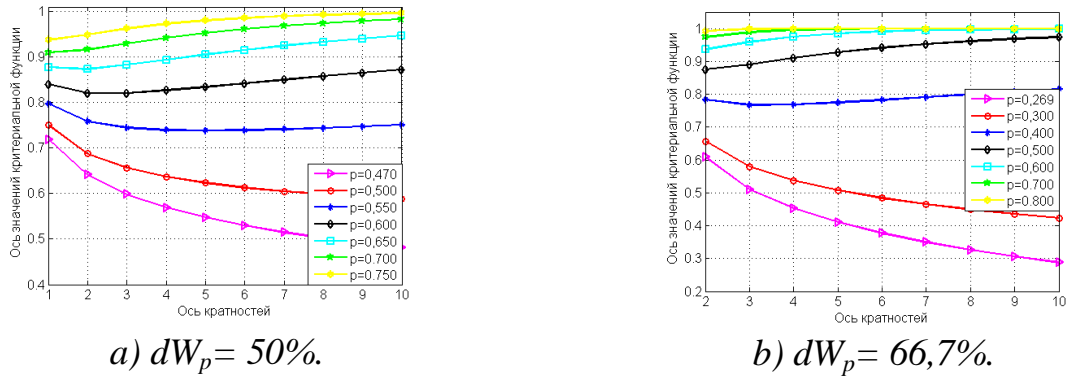


Рисунок 3 Зависимостей  $P_c$  от обобщенных кратностей  $K_i$  для разных  $p$

Из таблиц 4, 5 видно, что с уменьшением (“ужесточением”) реализуемых допусков показатель безотказности пассивно резервированной подсистемы  $P_c$  падает при одинаковой безотказности элементов  $p$  и минимальных индивидуальных кратностях резервирования  $K_i^{\text{и}}$ . Кроме того, с ростом обобщенной кратности показатели безотказности подсистем ЛА могут как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от безотказности элементов.

**Третья глава** посвящена решению двухкритериальной задачи синтеза.

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

$$P_c = \sum_{i=m}^n C_n^i \cdot p^i \cdot (1-p)^{(n-i)} \rightarrow \max ; \quad (14)$$

- показателю безотказности элементов резервированной подсистемы

$$p(p) \rightarrow \min. \quad (15)$$

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

$$\Delta P_c = P_c + (-p) = P_c - p, \quad (16)$$

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

- метод построения относительного критерия.

$$dP_c = \frac{(P_c - p)}{p} = \frac{P_c}{p} - 1, \quad (17)$$

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

Математическая постановка задачи синтеза структуры пассивного резервирования подсистем ЛА по двум комплексным критериям с учетом, предъявляемых к ним требований по безотказности допуску выглядит следующим образом:

$$\Delta P_c^* = \max_{(p, K_i^n)} (P_c(p, K_i^n, dW_p, P_{тр}, dW_n, p_{kr}) - p), \quad (18)$$

$$dP_c^* = \max_{(p, K_i^n)} (P_c(p, K_i^n, dW_p, P_{тр}, dW_n, p_{kr}) - p) / p. \quad (19)$$

При ограничениях:

$$p^* > p_{kr}, \quad (20)$$

$$dW_p \leq dW_n, \quad (21)$$

$$P_c^* \geq P_{тр}, \quad (22)$$

$$K_i^n = \frac{n_i}{m_i}, \quad n_i, m_i > 0, \text{ целые.} \quad (23)$$

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 (21). 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.

Будем сначала решать, так называемую, ослабленную задачу синтеза по двум комплексным критериям, которая выглядит следующим образом:

$$\Delta P_c^* = \max_{(p)} (P_c(p, K_i^n, dW_p, dW_n, p_{kr}) - p), \quad (24)$$

$$dP_c^* = \max_{(p)} (P_c(p, K_i^n, dW_p, dW_n, p_{kr}) - p) / p. \quad (25)$$

При ограничениях:

$$p^* > p_{kr}, \quad (26)$$

$$dW_p \leq dW_n, \quad (27)$$

$$K_i^n = \frac{n_i}{m_i}, \quad n_i, m_i > 0, \text{ целые.} \quad (28)$$

Ослабленная задача не учитывает ограничение по безотказности резервированной подсистемы (22) исходной задачи. Ее решение позволяет

найти зависимости оптимальных значений интересующих комплексных критериев  $\Delta P_c^*$ ,  $dP_c^*$  и доставляющих эти значения частных показателей  $P_{c\Delta}^*$ ,  $p_{\Delta}^*$  и  $P_{cd}^*$ ,  $p_d^*$  от индивидуальных кратностей резервирования  $K_i^{\text{н}}$ . Найденные таким образом зависимости  $\Delta P_c^* = \Delta P_c^*(K_i^{\text{н}})$ ,  $P_{c\Delta}^* = P_{c\Delta}^*(K_i^{\text{н}})$ ,  $p_{\Delta}^* = p_{\Delta}^*(K_i^{\text{н}})$ ,  $dP_c^* = dP_c^*(K_i^{\text{н}})$ ,  $P_{cd}^* = P_{cd}^*(K_i^{\text{н}})$ ,  $p_d^* = p_d^*(K_i^{\text{н}})$  позволяют найти решение искомой задачи синтеза по двум комплексным критериям.

Используя результаты расчетов оптимальных значений  $\Delta P_c^*$ ,  $P_{c\Delta}^*$  и  $p_{\Delta}^*$  составим сводную таблицу 6, позволяющую получать решение задачи синтеза подсистем ЛА по комплексному линейному критерию.

Таблица 6 Оптимальные характеристики обеспечения требуемого уровня безотказности подсистем ЛА

$P_{\text{тр}}$	Харак-тики Обеспечения $P_{\text{тр}}^*$	Значения характеристик 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	-	-
	$K_i^*$	$K_6$	$K_6^1, K_4^2$	$K_3$	$K_2^{1,2}$	-	-
	$p_{\Delta}^*$	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	-	-	-
	$K_i^*$	$K_7$	$K_8^1, K_5^2$	$K_1^1$	-	-	-
	$p_{\Delta}^*$	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	-
	$K_i^*$	$K_9$	$K_{10}^1, K_6^2$	$K_4$	$K_4^1, K_3^2$	$K_2$	-
	$p_{\Delta}^*$	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
	$K_i^*$	$K_9^2$	$K_6$	$K_6^1, K_4^2$	$K_3$	$K_2^{1,2}$	$K_1^1$



	$P_{\Delta}^*$	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
	$K_i^*$	$K_9$	$K_6^2$	$K_5$	$K_4^1, K_3^2$	$K_2^{1,2}$	$K_1$
	$P_{\Delta}^*$	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
	$K_i^*$	$K_9$	$K_7^2$	$K_5$	$K_6^1, K_4^2$	$K_3$	$K_2$
	$P_{\Delta}^*$	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	-	-	-
	$K_i^*$	$K_{10}$	$K_6$	$K_3$	-	-	-
	$P_{\Delta}^*$	0,929	0,950	0,969			
	$n^*, m^*$	70,60	48,42	27,24	-	-	-

Сводная таблица 6 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  $n^* = 7, m^* = 5$ . 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 6 находятся оптимальные структуры резервирования для других значений требуемой безотказности резервированной подсистемы ЛА.

Используя результаты расчетов оптимальных значений  $dP_c^*$ ,  $P_{cd}^*$ ,  $p_d^*$  составим сводную таблицу 7, позволяющую получать решение задачи синтеза подсистем ЛА по комплексному относительному критерию.

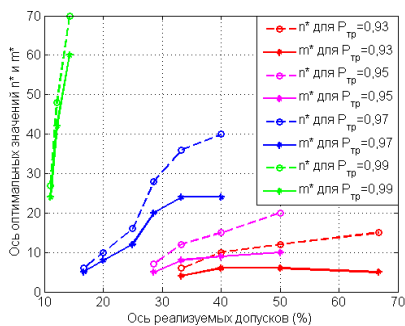
Таблица 7 Оптимальные характеристики обеспечения требуемого уровня безотказности подсистем ЛА

$P_{тр}$	Характеристики Обеспечения $P_{тр}^*$	Значения характеристик обеспечения $P_{тр}$					
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

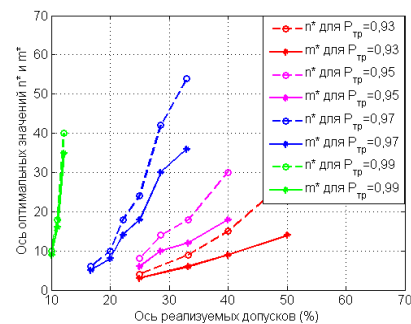
	$n^*, m^*$	64,48	45,35	35,28	22,18	12,10	7,6
0,99	$P_{cd}^*$	0,991	0,990	0,994	-	-	-
	$dW_p\%$	12,2	11,1	10	-	-	-
	$K_i^*$	$K_5$	$K_2$	$K_1$	-	-	-
	$P_d^*$	0,953	0,975	0,988	-	-	-
	$n^*, m^*$	40,35	18,16	10,9	-	-	-

Сводная таблица 7 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 7 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.

Для наглядного представления результатов, представленных в таблице 6 и 7, на рисунке 4 и 5 показаны зависимости оптимальной численности элементов, входящих в оптимальную структуру ( $n^*$  и  $m^*$ ) от значений реализуемых допусков для различных величин требуемой безотказности резервированных подсистем ЛА.

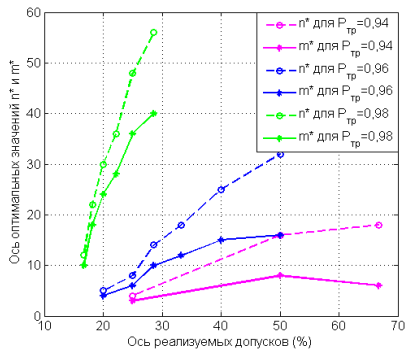


по линейному критерию

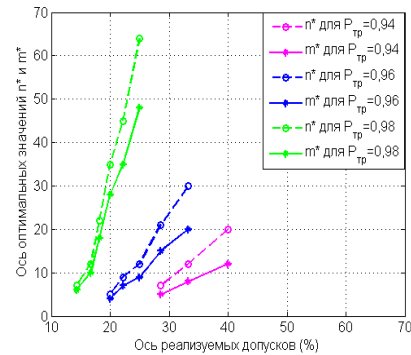


по относительному критерию

Рисунок 4 Сравнение результатов синтеза по линейному и относительному критериям для требуемых величин безотказностей  $P_{тр} = 0,93; 0,95; 0,97; 0,99$



по линейному критерию



по относительному критерию

Рисунок 5 Сравнение результатов синтеза по линейному и относительному критерию для требуемых безотказностей  $P_{тр} = 0,94; 0,96; 0,98$

Графики на рис. 4, 5 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. Приведем числовые данные, подтверждающие эти важные для практики выводы. Так, из таблиц 6, 7 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  $n^*/m^* = 18/12$ .

Из графиков на рисунках 4, 5 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.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Показано, что при исследовании и разработке пассивно резервированных подсистем с учетом допусков необходимо использовать

назначаемые и реализуемые допуски, которые существенно различаются по способу задания и шкале их значений; при этом для удобства использования реализуемых допусков предложено делить их по уровням; каждый реализуемый допуск может быть обеспечен линейкой (шкалой) возрастающих кратностей, начиная с минимальной, позволяющей удовлетворять требуемые значения безотказностей подсистем ЛА;

2. 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; 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; 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;

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

4. 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; 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; 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%); показано, что не существует допусков, при которых всегда выгодно применять минимальную индивидуальную кратность резервирования;

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

6. Проведено сравнение результатов решения задачи синтеза по комплексным линейному и относительному критериям и даны рекомендации по их использованию; 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; 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, а при реализуемых допусках не более 20% оптимальные значения искомым 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;

Таким образом, 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### ***Публикации в научных изданиях, входящих в перечень ВАК:***

1. *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.
2. *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.

3. *Vu Chong Tuan*. Синтез структуры пассивного резервирования подсистем летательных аппаратов с учетом допусков / В. М. Гришин, Vu Chong Tuan // Научно-технический вестник Поволжья. - 2020. - №3. - С. 28-35.
4. *Vu Chong Tuan*. Оптимизация безотказности пассивно резервированных технических подсистем с учетом допусков / Гришин В.М., Vu Ч.Т. // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. - №8(1). [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/02/GrishinVu\\_1\\_20\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/02/GrishinVu_1_20_1.pdf)  
**Публикации в научных изданиях, индексируемых в международных системах цитирования Scopus и Web of Science:**
5. *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). - С.82–87.
6. *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). - С. 96-103.  
**Публикации по теме диссертации в других научных изданиях:**
7. *Vu Chong Tuan*. Особенности исследования и разработки пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков / Гришин В.М., Vu 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.
8. *Vu Chong Tuan*. Учет допусков в задачах проектирования аэрокосмических систем / Гришин В.М., Vu Чонг Туан // Современные технологии в задачах управления, автоматизации 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.
9. *Vu Chong Tuan*. Исследование влияния существенных параметров на безотказность пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков / Vu 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.
10. *Vu Chong Tuan*. Выбор оптимальных параметров структур пассивно резервированных подсистем летательных аппаратов с учетом допусков / Гришин В.М., Vu 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.
11. *Vu Chong Tuan*. Анализ особенностей подсистем летательных аппаратов с учетом допусков и способов повышения их безотказности / Vu 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.