

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра механики материалов, конструкций и машин

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Составитель О.А. Фролова

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательную область «Инженерное дело, технологии и технические науки»

Оренбург
2020

УДК 669.15
ББК 34.5
Р 22

Рецензент – профессор, доктор технических наук Ю.А. Чирков

Р 22 **Расчет показателей надежности:** методические указания / составитель О.А. Фролова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2020. – 22 с.

Методические указания «Расчет показателей надежности» рекомендованы для практических занятий и самостоятельной работы обучающимся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательную область «Инженерное дело, технологии и технические науки» при освоения таких дисциплин, как «Методы расчета элементов конструкций по критериям работоспособности и надежности», «Прочность конструкций».

В методических указаниях представлены основные сведения из теории, задания для самостоятельной работы, примеры расчетов, вопросы для самопроверки и список использованных источников.

Методические указания подготовлены в рамках реализации проектов по совершенствованию содержания и технологий целевого обучения студентов в интересах организаций оборонно-промышленного комплекса

УДК 669.15
ББК 34.5

© Фролова О.А., составление, 2020
© ОГУ, 2020

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение | 4 |
| 1 Основные сведения из теории..... | 5 |
| 2 Вопросы для самопроверки..... | 10 |
| 3 Задания для самостоятельной работы «Расчет показателей надежности» | 11 |
| 3.1 Задание 1 – Определение наиболее вероятной причины отказа летательного аппарата | 11 |
| 3.2 Задание 2 – Определение вероятностей отказов элементов системы и вероятности безотказности работы летательного аппарата в интервале времени | 15 |
| 3.3 Задание 3 – Сравнительный анализ показателя надежности элементов систем летательного аппарата при различных схемах резервирования..... | 19 |
| Список использованных источников | 22 |

Введение

Методические указания «Расчет показателей надежности элементов систем летательного аппарата» предназначены для практических занятий и самостоятельной работы обучающимся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки, входящим в образовательную область «Инженерное дело, технологии и технические науки», при изучении таких дисциплин, как «Методы расчета элементов конструкций по критериям работоспособности и надежности», «Прочность конструкций».

Дисциплина «Методы расчета элементов конструкций по критериям работоспособности и надежности», относится к образовательному модулю «Технологии и оборудование для обеспечения высокотехнологичного производства на АО «ПО «Стрела», реализуемого в рамках проектов по совершенствованию содержания и технологий целевого обучения студентов в интересах организаций оборонно-промышленного комплекса для обучающихся направления подготовки 24.03.03 Авиационное строительство (профиль – Самолето- и вертолетостроение).

Результаты освоения дисциплины направлены на формирование следующих компетенций:

– способность к систематическому изучению и анализу информации при выполнении расчетов элементов авиационных конструкций по критериям работоспособности и надежности;

– способность применять инженерно-технический подход к решению вопросов выбора рациональных критериев работоспособности и надежности элементов конструкций летательных аппаратов;

– способность и готовность решать задачи повышения работоспособности и надежности элементов авиационных конструкций.

1 Основные сведения из теории

Одними из основных показателей, характеризующих качество современных летательных аппаратов (ЛА), являются показатели надежности.

Надежность – свойство авиационных конструкций сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять полетные задания в расчетных режимах и условиях эксплуатации, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Надежность является комплексным свойством, состоящим из следующей совокупности свойств: безотказность, долговечность, сохраняемость и ремонтпригодность.

Безотказность – свойство авиационных конструкций непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение времени выполнения полетного задания. Безотказность должна быть присуща изделию в любом из режимов его существования (в период работы, хранения и транспортировки), хотя часто безотказность рассматривается только применительно к режиму эксплуатации.

Долговечность – свойство авиационных конструкций сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Долговечность характеризует экономическую целесообразность эксплуатации самолета до предельного налета.

Ремонтпригодность – свойство авиационных конструкций, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов и повреждений, поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов. Свойство ремонтпригодности характеризует изделие не только при проведении ремонтов в предельном состоянии, но характеризует его приспособленность для профилактических мероприятий и восстановления после возникновения дефекта.

Сохраняемость – это свойство авиационных конструкций сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение его хранения и транспортировки.

Надежность авиационных конструкций является одним из свойств совокупности, определяющей его качества (эффективность). В эту совокупность свойств входят также безопасность и живучесть.

Безопасность – свойство авиационных конструкций непрерывно в течение времени полета сохранять работоспособное состояние тех систем и агрегатов, которые обеспечивают завершение полета без летного происшествия.

Живучесть – свойство авиационных конструкций сохранять работоспособное состояние при воздействии поражающих средств и нерасчетных нагрузок, а также при наличии накопившихся повреждений.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния систем авиационных конструкций. Отказ любого технического изделия всегда происходит внезапно в том смысле, что точно предсказать момент времени его возникновения невозможно. Поэтому с точки зрения математики отказы всегда моделируются случайными событиями.

Вероятность – это численная мера объективно существующей возможности появления (или не появления) изучаемого события.

Одними из показателей безотказности являются вероятность безотказной работы и интенсивность отказов.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ – это вероятность того, что в пределах заданной наработки в заданном интервале времени отказ изделия не возникает.

Вероятность отказа $Q(t)$ – это вероятность того, что объект откажет хотя бы один раз в течение заданной наработки, будучи работоспособным в начальный момент времени:

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (1)$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – плотность вероятности возникновения отказа в некоторый момент времени t наработки, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Летательный аппарат характеризуется различными параметрами. Несоответствие хотя бы одного из них номинальным значениям может привести к отказу всего изделия. Кроме того, каждый из этих параметров является случайной величиной, которая через функциональную зависимость зависит от большого числа других случайных параметров. Поэтому в теории надежности разработаны специальные подходы, позволяющие упростить решение поставленных задач.

Элемент – любая система, не подлежащая разбиению на более простые элементы. В зависимости от поставленной задачи элементом может быть агрегат, отсек, панель, узел, любая деталь и места их соединения или сопряжения, любое из сечений детали или конструкции, а также само изделие.

Резервирование – метод повышения надежности объекта введением дополнительных средств минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций.

Для элементов с недостаточной надежностью вводятся резервные элементы, переключение на которые происходит автоматически при отказе основного элемента. Резервный элемент может быть включен постоянно и выполнять функцию одновременно с основным элементом, а может подключаться только при отказе основного элемента.

Различают общее резервирование (резервируется объект в целом) и раздельное резервирование (резервируются элементы объекта по отдельности).

При постоянном резервировании элементы постоянно включены, при динамическом – с переключением структуры с целью обхода отказавшего элемента.

Основой структурных схем являются условные способы соединений звеньев, выражающих события безотказности работы отдельных элементов системы:

– последовательное соединение представляет собой совокупность звеньев, для которых необходимым и достаточным условием отказа является отказ хотя бы одного звена;

– параллельное соединение представляет собой совокупность звеньев, работоспособность которой нарушается только при условии отказа всех звеньев.

Формулы для расчета вероятности безотказной работы и вероятности отказов при последовательном соединении двух элементов имеют вид:

$$P(2) = P_1 \cdot P_2; \quad (2)$$

$$Q(2) = Q_1 + Q_2 - Q_1 \cdot Q_2. \quad (3)$$

Формулы для расчета вероятности безотказной работы и вероятности отказов при параллельном соединении двух элементов имеют вид:

$$P(2) = 1 - Q(2); \quad (4)$$

$$Q(2) = Q_1 \cdot Q_2. \quad (5)$$

Основное уравнение теории надежности, устанавливающее связь между вероятностью безотказной работы и интенсивностью отказов, имеет вид:

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (6)$$

При $\lambda = \text{const}$ для эксплуатационного периода формула (6) имеет вид:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (7)$$

При анализе и расчете показателей надежности математическим методом используются функции распределения:

– функция нормального распределения (описывает наработки на отказ объектов вследствие их износа и старения);

– экспоненциальное распределение (описывает надежность работы изделия в период его нормальной эксплуатации, когда постепенные отказы вследствие износа

и старения еще не проявляются и надежность характеризуется внезапными отказами, т.е. описывает вероятность возникновения отказов объекта);

– распределение Вейбулла (является двухпараметрическим универсальным законом, так как при изменении параметров оно в пределе может описывать нормальное распределение, логарифмически нормальное распределение, экспоненциальное распределение и др.);

– гамма-распределение (описывает наработку системы с резервированием, время восстановления, а также распределение постепенных отказов вследствие износа.);

– распределение Пуассона (используется для дискретных случайных величин. Описывает появление внезапных отказов в сложных системах и распределение времени восстановления, число отказов однотипного оборудования за определенный интервал времени).

2 Вопросы для самопроверки

- 1 Каковы задачи надежности по обеспечению качества летательных аппаратов?
- 2 Что такое надежность авиационных конструкций?
- 3 Какими показателями характеризуется надежность летательного аппарата?
- 4 Что такое долговечность авиационных конструкций?
- 5 Что такое безопасность авиационных конструкций?
- 6 Что такое живучесть авиационных конструкций?
- 7 Что такое безотказность авиационных конструкций?
- 8 Что такое сохраняемость авиационных конструкций?
- 9 Что такое ремонтпригодность авиационных конструкций?
- 10 Что такое отказ?
- 11 Является ли отказ случайной величиной?
- 12 Что характеризует вероятность события?
- 13 Каковы показатели безотказности?
- 14 Что такое вероятность безотказной работы?
- 15 Что представляет собой вероятность отказа?
- 16 Что характеризует интенсивность отказов?
- 17 Что такое элемент?
- 18 Что можно считать элементом авиационной конструкции?
- 19 Что представляет собой основное уравнение теории надежности?
- 20 Между какими показателями устанавливает связь основное уравнение теории надежности?
- 21 Что такое резервирование?
- 22 С какой целью проводят резервирование элементов?
- 23 Какие функции распределения используются для математической оценки надежности?

3 Задания для самостоятельной работы «Расчет показателей надежности»

3.1 Задание 1 – Определение наиболее вероятной причины отказа летательного аппарата

Параметры летательного аппарата (ЛА):

- двигательные установки $m = 3$ с вероятностями их отказов $Q_{1Д}, Q_{2Д}, Q_{3Д}$;
- системы энергообеспечения $n = 3$ с вероятностями их отказов $Q_{1Э}, Q_{2Э}, Q_{3Э}$;
- вспомогательные системы $N=1,5 \cdot 10^3$ с вероятностью отказа каждой Q_C ;
- вероятность выхода из строя летательного аппарата в случае отказа любых двух двигательных установок Q_D .

Условие работы: выход из строя летательного аппарата наступает, если выходят из строя все двигательные установки, либо все системы энергообеспечения, либо хотя бы одна из вспомогательных систем.

Для летательного аппарата с заданными параметрами требуется:

- определить вероятность отказа летательного аппарата с учетом дублирующих систем (основные и вспомогательные системы функционируют независимо друг от друга);
- определить вероятность отказа летательного аппарата без учета дублирующих систем (основные и вспомогательные системы функционируют независимо друг от друга);
- определить отношение вероятностей отказа летательного аппарата с учетом дублирующих систем и без их учета.

Исходные данные в зависимости от варианта задания представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные данные

| № варианта | $Q_{1Д}$ | $Q_{2Д}$ | $Q_{3Д}$ | $Q_{1Э}$ | $Q_{2Э}$ | $Q_{3Э}$ | Q_C | Q_D |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|
| 1 | $8 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-3}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | 10^{-3} | $3 \cdot 10^{-8}$ | 0,4 |
| 2 | $2 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-8}$ | 0,6 |
| 3 | $3 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-3}$ | $4 \cdot 10^{-8}$ | 0,5 |
| 4 | $8 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-3}$ | 10^{-4} | $4 \cdot 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-8}$ | 0,5 |
| 5 | $7 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | 10^{-3} | $2 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-8}$ | 0,4 |
| 6 | $6 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^{-3}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-3}$ | $4 \cdot 10^{-8}$ | 0,6 |
| 7 | $2 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-3}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-8}$ | 0,6 |
| 8 | $5 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $8 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-8}$ | 0,7 |
| 9 | $3 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^{-3}$ | 10^{-4} | $2 \cdot 10^{-3}$ | $4 \cdot 10^{-8}$ | 0,5 |
| 10 | $4 \cdot 10^{-4}$ | $8 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^{-4}$ | 10^{-3} | $2 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-8}$ | 0,8 |

Пример выполнения задания

Исходные данные к решению задачи представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Исходные данные

| Параметры систем ЛА | Числовые значения |
|---|---|
| Вероятности отказов двигательных установок ЛА | $Q_{1Д} = 8 \cdot 10^{-4}$; $Q_{2Д} = 3 \cdot 10^{-4}$; $Q_{3Д} = 5 \cdot 10^{-4}$ |
| Вероятность отказа ЛА в случае отказа любых двух двигательных установок | $Q_D = 0,7$ |
| Вероятности отказов систем энергообеспечения ЛА | $Q_{1Э} = 4 \cdot 10^{-3}$; $Q_{2Э} = 3 \cdot 10^{-4}$; $Q_{3Э} = 5 \cdot 10^{-3}$ |
| Вероятность отказа каждой вспомогательной системы ЛА | $Q_C = 2 \cdot 10^{-8}$ |
| Количество вспомогательных систем ЛА | $N = 1,5 \cdot 10^3$ |

1 Определение вероятности отказа летательного аппарата с учетом дублирующих систем (основные и вспомогательные системы функционируют независимо друг от друга).

Вероятность отказа летательного аппарата $Q_{ЛА}$ определяется по формуле:

$$Q_{ЛА} = 1 - (1 - Q_D) \cdot (1 - Q_Э) \cdot (1 - Q_{ВС}),$$

где Q_D – вероятность отказа двигателей летательного аппарата;

$Q_{\mathcal{E}}$ – вероятность отказа систем энергообеспечения летательного аппарата;

Q_{BC} – вероятность отказа вспомогательных систем летательного аппарата.

1.1 Вероятность отказа двигателей летательного аппарата Q_D :

$$Q_D = Q_D \cdot (Q_1 \cdot Q_2 + Q_1 \cdot Q_3 + Q_2 \cdot Q_3) = 0,7 \cdot (8 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 10^{-4} + 8 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-4} + 3 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-4}) = 55,3 \cdot 10^{-8}.$$

1.2 Вероятность отказа систем энергообеспечения летательного аппарата $Q_{\mathcal{E}}$ в силу независимости событий:

$$Q_{\mathcal{E}} = Q_{1\mathcal{E}} \cdot Q_{2\mathcal{E}} \cdot Q_{3\mathcal{E}} = 4 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 60 \cdot 10^{-10}.$$

1.3 Вероятность отказа вспомогательных систем летательного аппарата Q_{BC} в силу закона двойственности и независимости событий:

$$Q_{BC} = 1 - (1 - N \cdot Q_C) = N \cdot Q_C = 1,5 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-8} = 3 \cdot 10^{-5}.$$

1.4 Вероятность отказа летательного аппарата $Q_{ЛА}$:

$$Q_{ЛА} = 1 - (1 - Q_D) \cdot (1 - Q_{\mathcal{E}}) \cdot (1 - Q_{BC}) = 1 - (1 - 55,3 \cdot 10^{-8}) \cdot (1 - 60 \cdot 10^{-10}) \cdot (1 - 3 \cdot 10^{-5}) \approx 3 \cdot 10^{-5}.$$

Так как $60 \cdot 10^{-10} \leq 55,3 \cdot 10^{-8} \leq 3 \cdot 10^{-5}$ ($Q_{\mathcal{E}} < Q_D < Q_{BC}$), то из этого следует, что определяющей вероятностью отказа летательного аппарата является вероятность, связанная с отказом вспомогательных систем.

2 Определение вероятности отказа летательного аппарата без учета дублирующих систем (основные и вспомогательные системы функционируют независимо друг от друга).

Вероятность отказа летательного аппарата $Q'_{ЛА}$:

$$Q'_{ЛА} = Q_{1Д} + Q_{1\mathcal{E}} + Q_{BC} = Q_{1Д} + Q_{1\mathcal{E}} + N \cdot Q_C = 8 \cdot 10^{-4} + 4 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-5} = 4,83 \cdot 10^{-3}.$$

Так как $3 \cdot 10^{-5} \leq 8 \cdot 10^{-4} \leq 4 \cdot 10^{-3}$ ($Q_{BC} < Q_{1Д} < Q_{1\mathcal{E}}$), то из этого следует, что определяющей вероятностью выхода из строя летательного аппарата является вероятность, связанная с отказом систем энергообеспечения.

3 Отношение вероятностей отказа летательного аппарата с учетом дублирующих систем и без их учета:

$$\frac{Q'_{ЛА}}{Q_{ЛА}} = \frac{4,83 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-5}} = 161.$$

4 Результаты вычислений представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчета

| Вероятность отказа ЛА с учетом дублирующих систем $P_{ЛА} = 3 \cdot 10^{-5}$ | | |
|---|---|--|
| Вероятность отказа двигателей ЛА | Вероятность отказа систем энергообеспечения ЛА | Вероятность отказа вспомогательных систем ЛА |
| $Q_{Д} = 55,3 \cdot 10^{-8}$ | $Q_{Э} = 60 \cdot 10^{-10}$ | $Q_{ВС} = 3 \cdot 10^{-5}$ |
| Вероятность отказа ЛА без учета дублирующих систем $P'_{ЛА} = 4,83 \cdot 10^{-3}$ | | |
| Вероятность отказа двигательной установки ЛА | Вероятность отказа системы энергообеспечения ЛА | Вероятность отказа вспомогательных систем ЛА |
| $Q_{1Д} = 8 \cdot 10^{-4}$ | $Q_{1Э} = 4 \cdot 10^{-3}$ | $Q_{ВС} = 3 \cdot 10^{-5}$ |
| Отношение вероятностей отказа ЛА с учетом дублирующих систем и без их учета | $\frac{Q'_{ЛА}}{Q_{ЛА}} = 161$ | |

Таким образом, наиболее вероятной причиной отказа летательного аппарата, является отказ одной из вспомогательных подсистем, а отсутствие дублирующих систем увеличивает вероятность выхода из строя летательного аппарата в 161 раз, при этом определяющим фактором становится отказ системы энергоснабжения. Отсутствие дублирующих систем существенно увеличивает вероятность отказа летательного аппарата.

3.2 Задание 2 – Определение вероятностей отказов элементов системы и вероятности безотказности работы летательного аппарата в интервале времени

Параметры летательный аппарат (ЛА):

- интенсивности отказов элементов системы энергообеспечения $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$;
- отказы подчиняются экспоненциальному закону распределения случайной величины $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$.

Для летательного аппарата с заданными параметрами требуется:

- определить в интервале времени $t = 6$ ч вероятности отказов элементов системы (одного, двух, трех, четырех, пяти элементов);
- определить в интервале времени $t = 6$ ч вероятность безотказной работы пяти элементов системы энергообеспечения.

Исходные данные в зависимости от варианта задания представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Исходные данные

| № варианта | λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_4 | λ_5 |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 0,32 | 0,42 | 0,12 | 0,47 | 0,52 |
| 2 | 0,31 | 0,41 | 0,13 | 0,46 | 0,53 |
| 3 | 0,33 | 0,44 | 0,11 | 0,48 | 0,51 |
| 4 | 0,34 | 0,43 | 0,14 | 0,45 | 0,54 |
| 5 | 0,35 | 0,45 | 0,15 | 0,49 | 0,55 |
| 6 | 0,36 | 0,46 | 0,16 | 0,47 | 0,56 |
| 7 | 0,37 | 0,47 | 0,17 | 0,43 | 0,52 |
| 8 | 0,38 | 0,48 | 0,18 | 0,44 | 0,53 |
| 9 | 0,36 | 0,43 | 0,14 | 0,42 | 0,51 |
| 10 | 0,33 | 0,45 | 0,13 | 0,44 | 0,54 |

Пример выполнения задания

Исходные данные к решению задачи представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Исходные данные

| Параметры системы ЛА | Числовые значения |
|--|---|
| Интенсивности отказов элементов системы энергообеспечения ЛА | $\lambda_1 = 0,32; \lambda_2 = 0,42; \lambda_3 = 0,12;$ $\lambda_4 = 0,46; \lambda_5 = 0,51$ |
| Закон распределения длительности времени безотказной работы элементов ЛА | $P(t) = e^{-\lambda t}$ |

1 Вероятность безотказной работы 1-го элемента p_1 в заданном интервале времени:

$$p_1 = e^{-\lambda_1 t} = e^{-0,32 \cdot 3,6} = e^{-1,152} = 0,317.$$

2 Вероятность отказа 1-го элемента q_1 в заданном интервале времени:

$$q_1 = 1 - e^{-\lambda_1 t} = 1 - 0,317 = 0,683.$$

3 Вероятность безотказной работы 2-го элемента p_2 в заданном интервале времени:

$$p_2 = e^{-\lambda_2 t} = e^{-0,42 \cdot 3,6} = e^{-1,512} = 0,211.$$

4 Вероятность отказа 2-го элемента q_2 в заданном интервале времени:

$$q_2 = 1 - e^{-\lambda_2 t} = 1 - 0,211 = 0,789.$$

5 Вероятность безотказной работы 3-го элемента p_3 в заданном интервале времени:

$$p_3 = e^{-\lambda_3 t} = e^{-0,12 \cdot 3,6} = e^{-0,432} = 0,649.$$

6 Вероятность отказа 3-го элемента q_3 в заданном интервале времени:

$$q_3 = 1 - e^{-\lambda_3 t} = 1 - 0,649 = 0,351.$$

7 Вероятность безотказной работы 4-го элемента p_4 в заданном интервале времени:

$$p_4 = e^{-\lambda_4 t} = e^{-0,466} = e^{-2,76} = 0,063.$$

8 Вероятность отказа 4-го элемента q_4 в заданном интервале времени по формуле:

$$q_4 = 1 - e^{-\lambda_4 t} = 1 - 0,063 = 0,937.$$

9 Вероятность отказа 5-го элемента q_5 в заданном интервале времени:

$$P_5 = 1 - e^{-\lambda_5 t} = 1 - e^{-0,516} = 1 - e^{-3,06} = 1 - 0,047 = 0,953.$$

10 Вероятность безотказной работы 5-го элемента p_5 в заданном интервале времени:

$$q_5 = 1 - P_5 = 1 - 0,953 = 0,047.$$

11 Вероятность отказа одного элемента $Q(1)$ в заданном интервале:

$$\begin{aligned} Q(1) &= q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 = \\ &= 0,853 \cdot 0,08 \cdot 0,487 \cdot 0,063 \cdot 0,047 + 0,147 \cdot 0,92 \cdot 0,487 \cdot 0,063 \cdot 0,047 + 0,147 \cdot 0,08 \cdot 0,513 \cdot 0,063 \cdot 0,047 + \\ &+ 0,147 \cdot 0,08 \cdot 0,487 \cdot 0,937 \cdot 0,047 + 0,147 \cdot 0,08 \cdot 0,487 \cdot 0,063 \cdot 0,953 = 0,0000984 + 0,000195 + 0,0000177 + \\ &+ 0,000252 + 0,000344 = 0,00091. \end{aligned}$$

12 Вероятность отказа двух элементов $Q(2)$ в заданном интервале:

$$\begin{aligned} Q(2) &= q_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + \\ &+ p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot q_5 = \\ &= 0,853 \cdot 0,92 \cdot 0,487 \cdot 0,063 \cdot 0,047 + 0,853 \cdot 0,08 \cdot 0,513 \cdot 0,063 \cdot 0,047 + 0,853 \cdot 0,08 \cdot 0,487 \cdot 0,937 \cdot 0,047 + \\ &+ 0,853 \cdot 0,08 \cdot 0,487 \cdot 0,063 \cdot 0,953 + 0,147 \cdot 0,92 \cdot 0,513 \cdot 0,063 \cdot 0,047 + 0,147 \cdot 0,92 \cdot 0,487 \cdot 0,937 \cdot 0,047 + \\ &+ 0,147 \cdot 0,92 \cdot 0,487 \cdot 0,063 \cdot 0,953 + 0,147 \cdot 0,08 \cdot 0,513 \cdot 0,937 \cdot 0,047 + 0,147 \cdot 0,08 \cdot 0,513 \cdot 0,063 \cdot 0,953 + \\ &+ 0,147 \cdot 0,08 \cdot 0,487 \cdot 0,937 \cdot 0,953 = 0,00113 + 0,000104 + 0,00146 + 0,002 + 0,00021 + 0,0029 + 0,004 + \\ &+ 0,00027 + 0,00036 + 0,00511 = 0,0175. \end{aligned}$$

13 Вероятность отказа трех элементов $Q(3)$ в заданном интервале:

$$\begin{aligned}
Q(3) &= q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + \\
&+ q_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot p_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot q_5 = \\
&= 0,853 \cdot 0,92 \cdot 0,513 \cdot 0,063 \cdot 0,047 + 0,853 \cdot 0,92 \cdot 0,487 \cdot 0,937 \cdot 0,047 + 0,853 \cdot 0,92 \cdot 0,487 \cdot 0,063 \cdot 0,953 + \\
&+ 0,853 \cdot 0,08 \cdot 0,513 \cdot 0,937 \cdot 0,047 + 0,853 \cdot 0,08 \cdot 0,513 \cdot 0,063 \cdot 0,953 + 0,853 \cdot 0,08 \cdot 0,487 \cdot 0,937 \cdot 0,953 + \\
&+ 0,147 \cdot 0,92 \cdot 0,513 \cdot 0,937 \cdot 0,047 + 0,147 \cdot 0,92 \cdot 0,513 \cdot 0,063 \cdot 0,953 + 0,147 \cdot 0,92 \cdot 0,487 \cdot 0,937 \cdot 0,953 + \\
&+ 0,147 \cdot 0,08 \cdot 0,513 \cdot 0,937 \cdot 0,953 = 0,00119 + 0,0168 + 0,0299 + 0,00154 + 0,0021 + 0,0297 + 0,0031 + \\
&+ 0,00417 + 0,05881 + 0,00539 = 0,1473.
\end{aligned}$$

14 Вероятность отказа четырех элементов $Q(4)$ в заданном интервале:

$$\begin{aligned}
Q(4) &= q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot p_5 + q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_4 \cdot q_5 + q_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot q_4 \cdot q_5 + p_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot q_5 = \\
&= 0,853 \cdot 0,92 \cdot 0,513 \cdot 0,937 \cdot 0,047 + 0,853 \cdot 0,92 \cdot 0,513 \cdot 0,063 \cdot 0,953 + 0,853 \cdot 0,92 \cdot 0,487 \cdot 0,937 \cdot 0,953 + \\
&+ 0,147 \cdot 0,92 \cdot 0,513 \cdot 0,937 \cdot 0,953 = 0,0178 + 0,0242 + 0,3413 + 0,062 = 0,4453.
\end{aligned}$$

15 Вероятность отказа пяти элементов $Q(5)$ в заданном интервале:

$$Q(5) = q_1 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot q_5 = 0,853 \cdot 0,92 \cdot 0,513 \cdot 0,937 \cdot 0,953 = 0,359.$$

16 Вероятность безотказной работы пяти элементов $P(5)$ за время испытания в заданном интервале:

$$P(5) = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 = 0,147 \cdot 0,08 \cdot 0,487 \cdot 0,063 \cdot 0,047 = 0,000017.$$

17 Результаты вычислений представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты расчета

| № элемента/ параметр | 1-ый элемент | 2-ой элемент | 3-ий элемент | 4-ый элемент | 5-ый элемент |
|--------------------------------|--|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Вероятность отказа | $q_1 = 0,853$ | $q_2 = 0,92$ | $q_3 = 0,513$ | $q_4 = 0,937$ | $q_5 = 0,953$ |
| Вероятность безотказной работы | $p_1 = 0,147$ | $p_2 = 0,08$ | $p_3 = 0,487$ | $p_4 = 0,063$ | $p_5 = 0,047$ |
| Параметры | | | | | |
| Количество элементов | | | | | |
| Один элемент | Вероятность отказа: $Q(1) = 0,00091$ (0,91 %) | | | | |
| Два элемента | Вероятность отказа: $Q(2) = 0,0175$ (1,75 %) | | | | |
| Три элемента | Вероятность отказа: $Q(3) = 0,1473$ (14,73 %) | | | | |
| Четыре элемента | Вероятность отказа: $Q(4) = 0,4453$ (44,53 %) | | | | |
| Пять элементов | Вероятность отказа: $Q(5) = 0,359$ (35,90 %) | | | | |
| Пять элементов | Вероятность безотказной работы: $P(5) = 0,000017$ (0,0017 %) | | | | |

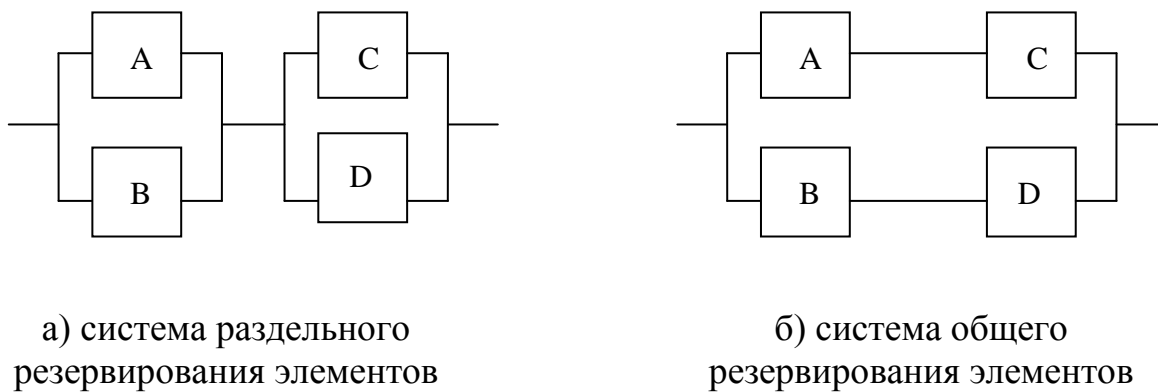
Таким образом, в заданном интервале времени наиболее вероятным событием является отказ четырех элементов, а наименее вероятным является отказ одного элемента. Вероятность безотказной работы пяти элементов в заданном интервале времени относительно небольшая и составляет 0,0017 %.

3.3 Задание 3 – Сравнительный анализ показателя надежности элементов систем летательного аппарата при различных схемах резервирования

Даны две системы летательного аппарата (ЛА): система отдельного резервирования элементов и система общего резервирования элементов (рисунок 3.1). Показатели надежности элементов A, B, C, D следующие: P_A, P_B, P_C, P_D .

Требуется определить показатель надежности данных систем и сравнить между собой.

Исходные данные в зависимости от варианта задания представлены в таблице 3.7.



A, B, C, D – элементы системы.

Рисунок 3.1 – Схемы резервирования элементов систем ЛА

Таблица 3.7 – Исходные данные

| № варианта | P_A | P_B | P_C | P_D |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 |
| 2 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,4 |
| 3 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 |
| 4 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 |
| 5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| 6 | 0,9 | 0,7 | 0,6 | 0,5 |
| 7 | 0,8 | 0,6 | 0,5 | 0,3 |
| 8 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,2 |
| 9 | 0,9 | 0,7 | 0,5 | 0,3 |
| 10 | 0,6 | 0,5 | 0,3 | 0,2 |

Пример выполнения задания

Исходные данные:

– показатели надежности $P_A = 0,9$; $P_B = 0,8$; $P_C = 0,7$; $P_D = 0,6$.

1 Рассмотрим систему раздельного резервирования элементов.

1.1 Выделим две группы элементов: группу AB и группу CD , элементы которых соединены между собой параллельно.

1.2 Определим показатель надёжности P_{AB} элементов группы AB по формуле:

$$P_{AB} = 1 - (1 - P_A) \cdot (1 - P_B) = 1 - (1 - 0,9)(1 - 0,8) = 0,98.$$

1.3 Определим показатель надёжности элементов P_{CD} группы CD по формуле:

$$P_{CD} = 1 - (1 - P_C) \cdot (1 - P_D) = 1 - (1 - 0,7)(1 - 0,6) = 0,88.$$

1.4 Группы элементов AB и CD соединены между собой последовательно.

Показатель надежности системы P_p определим по формуле:

$$P_p = P_{AB} \cdot P_{CD} = 0,98 \cdot 0,88 = 0,8624.$$

2 Рассмотрим систему раздельного резервирования элементов.

2.1 Выделим две группы элементов: группу AB и группу CD , элементы которых соединены между собой последовательно.

2.2 Определим показатель надёжности элементов P_{AC} группы AC по формуле:

$$P_{AC} = P_A \cdot P_C = 0,9 \cdot 0,7 = 0,63.$$

2.3 Определим показатель надёжности элементов P_{BD} группы BD по формуле:

$$P_{BD} = P_B \cdot P_D = 0,8 \cdot 0,6 = 0,48.$$

2.4 Группы элементов AC и BD соединены между собой параллельно.

Показатель надёжности системы P_o определим по формуле:

$$P_o = 1 - (1 - P_{AC}) \cdot (1 - P_{BD}) = 1 - (1 - 0,63)(1 - 0,48) = 0,8076.$$

2.5 Результаты расчета представлены в таблице 3.8

Таблица 3.8 – Результаты расчета

| Показатель надёжности | Система отдельного резервирования элементов | | Система общего резервирования элементов | |
|-----------------------|---|-----------------|---|-----------------|
| | $P_{AB} = 0,98$ | $P_{CD} = 0,89$ | $P_{AC} = 0,63$ | $P_{BD} = 0,48$ |
| группы элементов | | | | |
| система элементов | $P_p = 0,8624$ | | $P_o = 0,8076$ | |

Таким образом, отличие в значениях показателя надёжности элементов систем ЛА обусловлено различным соединением подсистем. Отдельное резервирование более выгодно при прочих равных условиях изготовления и эксплуатации системы.

Список использованных источников

- 1 Когге, Ю.К. Основы надежности авиационной техники: учебник / Ю.К. Когге, Р.А. Майский. – М.: Машиностроение, 1993. – 176 с.
- 2 Основы надежности летательных аппаратов: учебник для студентов высших технических учебных заведений. / В.А.Барвинок, В.И.Богданович, П.А. Бордаков, Б.П.Пешков и [др.]; под ред. проф. В.А.Барвинка. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.
- 3 Половко, А. М. Основы теории надежности: учеб. пособие / А. М. Половко, С. В. Гуров.- 2-е изд., перераб. и доп. - СПб. : БВХ-Петербург, 2006. - 704 с. : ил.
- 4 Долгин, В.П. Надежность технических систем : учебное пособие [Электронный ресурс] / В.П. Долгин, А.О. Харченко - Вузовский учебник, НИЦ ИНФРА-М, 2015.
- 5 Половко, А.М. Сборник задач по теории надежности / А.М. Половко, И.М. Маликов, А.Н. Жигарев, В. И. Зарудный; под ред. А. М. Половко, И. М. Маликова. – М.: Сов. радио, 1972. – 408 с.
- 6 Труханов, В. М. Надежность технических систем / В. М. Труханов. – М. : Машиностроение, 2008. – 585 с.
- 7 Надежность технических систем: учеб. пособие для студентов технических специальностей вузов / под общ. ред. Е.В. Сугака, Н.В. Василенко. – Красноярск: НИИ СУВПТ, 2000. – 594 с.
- 8 ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. – Введен 01.03.2017. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200136419>.