



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ДГТУ)

Факультет «Авиационное»

Кафедра «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и наземного оборудования»

**Методы оценки эффективности и надежности авиационной
техники**

*Методические рекомендации к выполнению практических заданий
магистрантов очной и заочной формы обучения
направления подготовки*

*25.04.01 «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей»
программа «Техническая эксплуатация авиационной техники»*

Ростов-на-Дону
2026

Составитель:

ктн, профессор, Решенкин А.С.

Методические рекомендации составлены с учётом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования подготовки магистров.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения
2. Практическое задание №1. Анализ эффективности процесса эксплуатации летательных аппаратов по показателям безотказности ЛА, безопасности и регулярности полетов
3. Практическое задание №2. Анализ эффективности процесса технической эксплуатации летательных аппаратов по показателям эффективности использования ЛА по времени
4. Практическое задание №3. Анализ эффективности процесса технической эксплуатации летательных аппаратов по показателям его экономичности
5. Краткие сведения из теории надёжности
6. Общая характеристика метода
7. Модель надёжности
8. Основные этапы оценки безотказности варианта схемы
9. Анализ функциональных связей между элементами (этап 1)
10. Построение структурной схемы надёжности системы (этап 2)
11. Уравнение надёжности системы (схемы) (этап 3)
12. Оценка интенсивности отказов системы через интенсивности отказов элементов
- Практическое задание №4. Метод структурных схем
- Практическое задание №5. Анализ надёжности системы самолёта на этапе проектирования
- Приложение 1. Принципиальные схемы систем
- Приложение 2. Параметры потока отказов элементов систем
- Приложение 3. Нарботка на отказ подсистем самолёта
- Литература

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Целью проведения практических занятий является овладение научными методами анализа, систематизация и обобщение теоретических знаний, приобретенных при изучении материала по дисциплине «Методы оценки эффективности и надежности авиационной техники», получение навыков и умений применять теоретические знания к решению практических задач эксплуатации летательных аппаратов.

1.2. Практические занятия включают решение задач анализа эффективности процессов технической эксплуатации (ПТЭ) летательных аппаратов (ЛА).

1.3. Пособие по каждому практическому занятию содержит название темы и цель работы, характеристики объекта, необходимые теоретические сведения по теме, методические указания по выполнению работы. По каждому практическому занятию предусмотрены варианты исходных данных, полученные в результате эксплуатационных наблюдений в Авиапредприятиях гражданской авиации.

Выбор варианта задания производится согласно шифру зачетной книжки по последней цифре. Например, для шифра М82425, вариант № 5. Кроме того преподаватель может выдать обучающимся дополнительные варианты заданий.

1.4. По результатам выполнения каждого практического занятия обучающиеся составляют отчет. Каждый отчет должен содержать тему и цель работы, исходные данные выполненного варианта, результаты расчетов в виде таблиц и графиков, выводы. Результаты расчетов приводятся в табличной форме, при этом, должны быть даны примеры расчетов с подстановкой исходных данных в расчетные формулы. Отчет подписывается обучающимся.

2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1- 4 часа

Тема: Анализ эффективности процесса эксплуатации летательных аппаратов по показателям безотказности ЛА, безопасности и регулярности полетов.

Цель: Практическое освоение методов анализа эффективности ПТЭ ЛА по показателям безотказности ЛА, безопасности и регулярности полетов.

2.1. Объект практического занятия.

Объектом практического занятия являются ПТЭ ЛА авиапредприятия, имеющие иерархическую структуру.

2.2. Техническое задание.

Практическое занятие состоит из ряда заданий.

2.2.1. Изучение основных теоретических сведений (п. 2.3), в том числе иерархической структуры ПТЭ ЛА и системы показателей его эффективности:

привести определения основных понятий – процессный подход, процесс ТЭ ЛА (п. 2.3.1), иерархическая структура ПТЭ ЛА, уровни управления ПТЭ ЛА (п. 2.3.2), эффективность операции, показатель эффективности (п.2.3.3), раскрыть содержание иерархической структуры модели ПТЭ ЛА (п. 2.3.2);

изучить состав системы показателей эффективности ПТЭ ЛА и обосновать выбор показателей безотказности ЛА, безопасности и регулярности полетов (п. 2.3. 3).

2.2.2. Анализ эффективности ПТЭ ЛА по показателям безотказности ЛА, безопасности и регулярности полетов:

сформировать исходные данные для анализа эффективности ПТЭ ЛА по показателям безотказности ЛА, безопасности и регулярности полетов для своего варианта (табл. 2.4);

выполнить оценку показателей безотказности ЛА, безопасности и регулярности полетов по формулам табл. 2.3.

Работа выполняется в соответствии с методическими рекомендациями, приведенными в п. 2.4.

2.3. Основные теоретические сведения.

2.3.1. Основные понятия, термины и определения.

Процессный подход представляет собой применение в Авиапредприятиях системы ПТЭ ЛА совместно с идентификацией этих процессов, их взаимодействием и управлением этими процессами (ГОСТ Р ИСО 9001-2015).

Процесс технической эксплуатации ЛА представляет собой любую деятельность по технической эксплуатации ЛА, использующую ресурсы и управляемую для обеспечения способности превращать входящие элементы в выходящие. Совокупность взаимосвязанных ПТЭ ЛА образует последовательную во времени смену состояний эксплуатации в соответствии с принятой стратегией.

2.3.2. Формирование иерархической структуры модели ПТЭ ЛА.

При построении модели ПТЭ ЛА все этапы эксплуатации объекта следует разбить на *непересекающиеся подмножества* (состояния) $S_i, i = \overline{1, r}$.

С формальной точки зрения выбор $S_i, i = \overline{1, r}$ должен подчиняться единственному условию: события «объект находится в состоянии $S_i, i = \overline{1, r}$ » образуют полную группу событий.

Одним из вариантов выделения состояний $S_i, i = \overline{1, r}$ является разбиение множества всех состояний технической эксплуатации ЛА на группы, в соответствии с порядком среднего времени пребывания в этих состояниях. Пусть, например, такое разбиение имеет вид:

$$S_0 = (s_1, \dots, s_{r_0}), S_1 = (s_{r_0+1}, \dots, s_{r_1}), S_2 = (s_{r_1+1}, \dots, s_{r_2}), S_3 = (s_{r_2+1}, \dots, s_r), \quad (2.1)$$

где $S_0, \dots, S_r$ - время пребывания объекта в состояниях из S_0, S_1 - порядка нескольких часов, в состояниях из S_2 - порядка нескольких суток, из S_3 - порядка нескольких недель и больше.

Исходная структура ПТЭ ЛА (табл. 2.1) сформирована с учетом существующей в системе государственной статистической отчетности формы № 34-ГА «Сведения о календарном времени самолетов, вертолетов». В этой

ситуации совершенно ясно, что какие-либо меры по улучшению ПТЭ ЛА в состояниях групп S_0, S_1 можно обосновать и применить гораздо быстрее, чем соответствующие меры по отношению к группе S_2 или S_3 .

При таком подходе следует строить модели ПТЭ ЛА на разных *уровнях управления* его иерархической структуры следующим образом (табл. 2.2):

$$\begin{aligned} 0\text{-й уровень } U_0 & - \text{состояния } s_1, \dots, s_{r_0}, \\ 1\text{-й уровень } U_1 & - \text{состояния } S_0, s_{r_0+1}, \dots, s_{r_1}, \\ 2\text{-й уровень } U_2 & - \text{состояния } S_1, s_{r_1+1}, \dots, s_{r_2}, \\ 3\text{-й уровень } U_3 & - \text{состояния } S_1 \cup S_2, s_{r_2+1}, \dots, s_r. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Это означает, что

$$U_1 = \{S_0 \cup S_1\}, U_2 = \{S_0 \cup S_1 \cup S_2\}, U_3 = \{S_0 \cup S_1 \cup S_2 \cup S_3\}. \quad (2.3)$$

Тогда иерархическая структура модели ПТЭ ЛА может быть представлена в виде графа состояний и переходов управляемого ПТЭ ЛА (рис. 2.3). Использование приведенных методических рекомендаций по построению модели управления ПТЭ ЛА направлено на повышение его эффективности.

2.3.3. Эффективность ПТЭ ЛА.

В теории эффективности систем формализация цели осуществляется путем введения множества параметров целеполагания Y_{mp} , задающих желаемый (требуемый) результат, который может быть получен путем выполнения определенных действий по преобразованию некоторых ресурсов. Такую совокупность действий называют операцией. Реальный результат операции Y может отличаться от требуемого Y_{mp} .

Эффективность операции есть степень соответствия реального результата требуемому или степень достижения цели операции. Показатель эффективности – мера степени соответствия реального результата операции требуемому и мера достижения цели операции. Целевой подход к управлению процессами ТЭ ЛА позволяет определить главную цель управления и расчленив ее на ряд подцелей с учетом иерархической структуры процесса эксплуатации ЛА.

Результативность – степень реализации запланированной деятельности и достижения запланированных результатов.

Эффективность – связь между достигнутым результатом и использованными ресурсами.

Главной целью управления ПТЭ ЛА является полное и своевременное удовлетворение потребностей авиапредприятия в исправных, соответствующих нормам летной годности ЛА, обеспечение безопасности и регулярности полетов, интенсивности использования ЛА при минимальных затратах времени, труда и средств на реализацию ПТЭ ЛА.

Таблица 2.1

Структура ПТЭ ЛА

Фонд времени	Парк ЛА (Ф)																										
	Исправные (И)				Неисправные (Н)																						
	В ожидании рейса				Простои по оргпричинам		Простои по КПН		Восстановление поврежденных		Продление ресурсов и сроков службы		Сертификация экземпляра ЛА		Расследование АП и списание ЛА		Ремонт, списание										
Состояния	В рейсе	Обеспечение вылета		В резерве		Простои по метео		Не совершавшие полетов		Техническое обслуживание		Отсутствие запчастей		Отсутствие двигателей		Доработки по бюллетеням		Рекламации промышленности		В	П ^д	Є	Л/С	О ^д	Р	Ж	С
		К	Е	Г	М	А	ТО	З	Дв	Д	Ж																
Обозначения	U ₀	U ₁												U ₂												U ₃	
Уровни управления																											

Условные обозначения: Ф – общий фонд времени парка ЛА, в том числе, фонды времени И – исправных ЛА и Н – неисправных ЛА, КПН- конструктивно-производственные недостатки, АП – авиапроисшествия, АРЗ - авиаремонтный завод.

Таблица 2.2

Иерархическая структура ПТЭ ЛА

Уровни управления				Подмножества состояний ПТЭ ЛА		Состояния ПТЭ ЛА	
U ₀	U ₁	U ₂	U ₃	Обозначение, $S_i, i = \overline{1, r}$	Наименование ЛА	Обозначение	Наименование
+	+	+	+	$S_0 = (s_1, \dots, s_{r_0})$	Исправные в рейсе	K	В рейсе
	+	+	+	$S_1 = (s_{r_0+1}, \dots, s_{r_1})$	Исправные в авиапредприятии	П	в том числе в полете
						Е	Обеспечение вылета
						Г	В резерве
						М	Простои по метео
						А	Исправные, не совершавшие полетов
		+	+	$S_2 = (s_{r_1+1}, \dots, s_{r_2})$	Неисправные в авиапредприятии	ТО	Техническое обслуживание
						З	Отсутствие запасных частей
						Дв	Отсутствие двигателей
						Д	Доработки по боллетеням
						Ж	Рекламации промышленности
						В	Восстановление повреждений
						Пр	Продление ресурсов и сроков службы
						Э	Сертификация экземпляра ЛА
						Л/С	Расследование происшествий/ списание
			+	$S_3 = (s_{r_2+1}, \dots, s_r)$	Неисправные в Центре ТОиР (АРЗ)	ОР	Ожидание ремонта
						Р	Ремонт
						ЖР	Рекламации ремонтным заводам

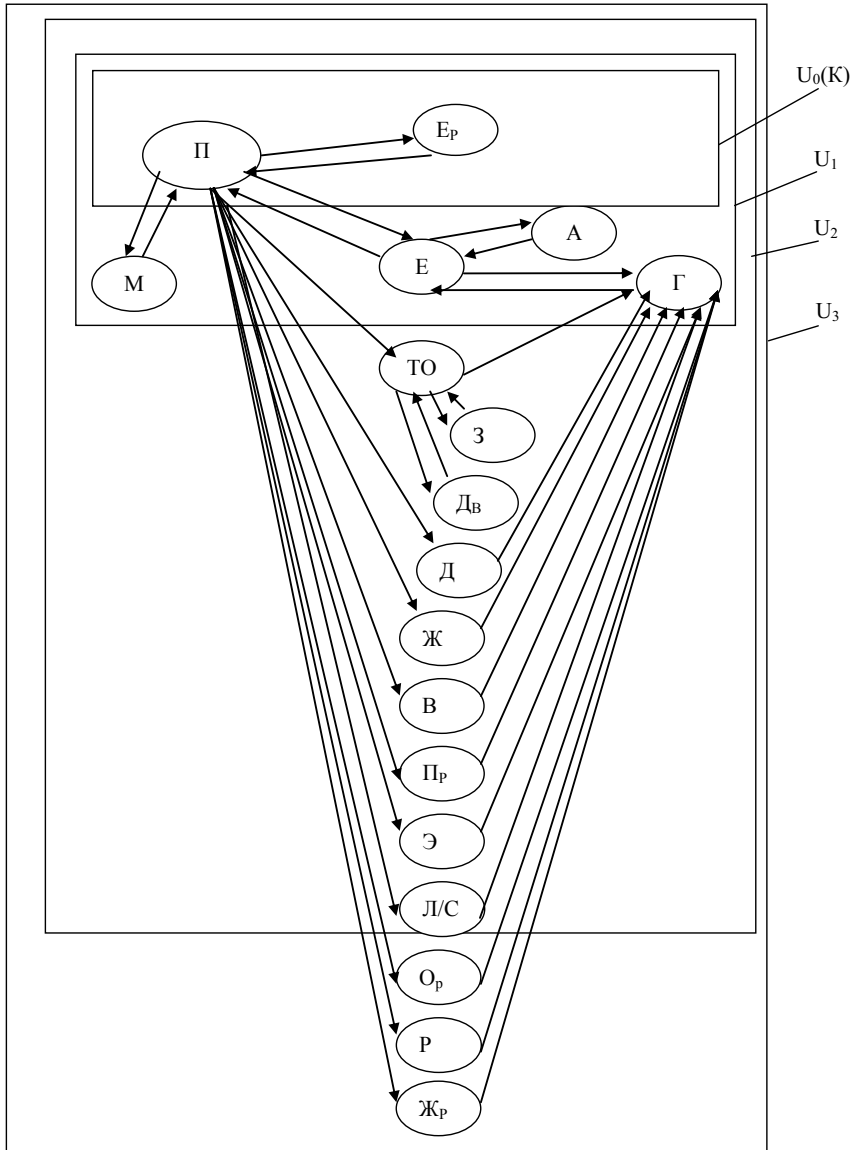


Рис. 2.1. Иерархическая структура модели ПТЭ ЛА: U₀ – нулевой уровень управления (цикл использования по назначению), U₁ – 1-ый уровень управления (оперативный цикл), U₂ – 2-ой уровень управления (периодический цикл), U₃ – 3-ий уровень управления (ремонтный цикл). Обозначения состояний приведены в табл. 2.1.

Степень достижения главной цели управления ПТЭ ЛА характеризуется системой показателей эффективности (табл. 2.3), включающей показатели: безотказности ЛА и безопасности полетов; регулярности отправления ЛА в рейсы; использования ЛА по времени; экономичности ПТЭ ЛА.

Частные показатели Π_{ikj} дифференцированно оценивают степень влияния отдельных (частных) причин на эффективность процесса в целом (i -й функциональной системы, по k -й причине, на j -м уровне управления).

Относительные показатели $\bar{\Pi}$ используются для оценки достигнутого уровня эффективности ПТЭ ЛА:

$$\bar{\Pi} = \Pi / \Pi_{\phi}, \text{ (a)} \quad \bar{\Pi} = \Pi_{\phi} / \Pi \text{ (b)}. \quad (2.4)$$

где Π , Π_{ϕ} - значение оцениваемого и базового показателей, соответственно.

Применяется та формула, по которой значение относительного показателя увеличивается при повышении эффективности ПТЭ ЛА. Например, для показателей $P_j(t)$, K_{ij} используется формула (2.4 а), а для показателей $K_{1000\Pi}$, τ_{ydj} , формула (2.4 б).

2.4. Методические рекомендации по выполнению практических занятий

2.4.1. Вопросы, рекомендуемые к рассмотрению (ПЗ-1).

1. Дайте определения понятий: процессный подход и ПТЭ ЛА.
2. Что понимается под иерархической структурой ПТЭ ЛА?
3. Какие непересекающиеся подмножества состояний выделяются в ПТЭ ЛА?
4. Какие определены уровни управления ПТЭ ЛА?
5. Какие главные цели управления ПТЭ ЛА?
6. Что понимается под эффективностью ПТЭ ЛА?
7. Что такое показатель эффективности ПТЭ ЛА (операции)?
8. Какие виды показателей включает система показателей эффективности ПТЭ ЛА?
9. Какие показатели эффективности ПТЭ ЛА характеризуют безотказность ЛА и безопасность полетов?
10. Какие показатели эффективности процесса ТЭ ЛА характеризуют регулярность отправления ЛА в рейсы?
11. Какие источники информации используются для анализа безотказности ЛА и безопасности полетов?
12. Какие источники информации используются для анализа регулярности отправления ЛА в рейсы?
13. Какие формулы используются для оценки показателей безотказности ЛА и безопасности полетов?
14. Какие формулы используются для оценки показателей регулярности отправления ЛА в рейсы?

Таблица 2.3

Система показателей эффективности ПТЭ ЛА

Наименование показателя	Обозначения показателей	Оценка показателей		
		Расчетные формулы	Исходные данные	
1	2	3	4	
1. Безотказность ЛА и безопасность полетов				
1.1. Количество отказов, выявленных в полете на 1000 ч налета	$K_{1000п}$	$K_{1000п} = \frac{n_{\cdot} \cdot 1000}{H}$	$n_{п}$ - суммарное количество отказов, выявленных в полете, H - наработка (налет) парка ЛА	
1.2. Количество отказов, приведших к инцидентам на 1000 ч налета	$K_{1000инц}$	$K_{1000инц} = \frac{n_{инц} \cdot 1000}{H}$	$n_{инц}$ - суммарное количество отказов, приведших к инцидентам, H - наработка (налет) парка ЛА	
1.3. Суммарное количество отказов и повреждений, выявленных в полете и на земле на 1000 ч налета	$K_{1000с\cdot j}$	$K_{1000с\cdot j} = \frac{n_{с\cdot j} \cdot 1000}{H}$	$n_{с\cdot j}$ - суммарное количество отказов и повреждений, выявленных в полете и на земле	
1.4. Нарботка на отказ	T_o	$T_o = \frac{H}{n_{с\cdot j}}$	H - наработка (налет) парка ЛА $n_{с\cdot j}$ - суммарное количество отказов и повреждений, выявленных в полете и на земле	
1.5. Вероятность не возникновения отказов, приведших к инцидентам	$P_{инц}(t)$	$P_{инц}(t) = 1 - \frac{n_{инц}}{N_{п}}$	$n_{инц}$ - суммарное количество отказов, приведших к инцидентам, $N_{п}$ - общее количество полетов	
2. Регулярность отправления ЛА в рейсы				
2.1. Вероятность регулярности отправлений ЛА в рейсы с учетом задержек по техническим причинам	$P_{рот}(t)$	$P_{рот}(t) = 1 - \frac{n_3(t)}{N_{п}}$	$n_3(t)$ - количество задержек отправлений ЛА в рейсы по техническим причинам, $N_{п}$ - общее количество полетов	

Продолжение табл.2.3

	2	3	4
2.2. Средняя продолжительность задержки вылета по техническим причинам	$t_{з\text{ ср}}$	$t_{з\text{ ср}} = \frac{t_{з\text{ сум}}}{n_3(t)}$	$t_{з\text{ сум}}$ - суммарное время задержки рейсов, $n_3(t)$ - количество задержек отправок ЛА в рейсы по техническим причинам
3. Использование ЛА по времени			
3.1 Коэффициент использования на j -м уровне управления	$K_{и j}$	$K_{и j} = \frac{H}{T_j}$	H - налет парка ЛА; T_j - календарный фонд времени парка ЛА на j -м уровне управления
3.2. Коэффициент исправности	$K_{испр j}$	$K_{испр j} = \frac{t_{испр j}}{T_j}$	$t_{испр j}$ - суммарное время пребывания парка ЛА в исправном состоянии на j -м уровне управления
3.3. Удельные простои ЛА по техническим причинам на j -м уровне управления	$K_{п j}$	$K_{п j} = \frac{t_{п\text{ сум } j}}{H}$	$t_{п\text{ сум } j}$ - суммарные простои парка ЛА по техническим причинам
3.4. Коэффициент эффективности использования на j -м уровне управления	$K_{эи j}$	$K_{эи j} = \frac{T_{j-1}}{T_j}$	T_{j-1} , T_j - фонд календарного времени на $j-1$, j -м уровне управления соответственно
4. Экономичность процессов			
4.1. Удельные трудовые затраты на техническую эксплуатацию ЛА на j -м уровне управления	$\tau_{уд j}$	$\tau_{уд} = \frac{\tau_{сум j}}{H}$	$\tau_{сум j}$ - суммарные трудовые затраты на техническую эксплуатацию ЛА на j -м уровне управления
4.2. Удельные материальные затраты на техническую эксплуатацию ЛА на j -м уровне управления	$c_{уд M j}$	$c_{уд M} = \frac{C_{сум M j}}{H}$	$C_{сум M j}$ - суммарные материальные затраты на техническую эксплуатацию ЛА на j -м уровне управления
4.3. Удельная себестоимость работ по технической эксплуатации ЛА на j -м уровне управления	$c_{уд j}$	$c_{уд} = \frac{C_{сум j}}{H}$	$C_{сум j}$ - суммарные затраты на техническую эксплуатацию ЛА на j -м уровне управления

2.4.2. Изучение иерархической структуры ПТЭ ЛА и системы показателей его эффективности:

определение основных понятий – процессный подход, ПТЭ ЛА (п. 2.3.1), иерархическая структура ПТЭ ЛА, уровни управления ПТЭ ЛА (п. 2.3.2), эффективность операции, показатель эффективности (п. 2.3.3);

раскрытие содержания иерархической структуры модели ПТЭ ЛА (п.2.3.2), порядка разбиения множества состояний ПТЭ ЛА на непересекающиеся подмножества (2.1) и определения уровней управления (2.2, 2.3), ознакомление с моделью ПТЭ ЛА в форме графа его состояний и переходов (рис. 2.1);

изучение системы показателей эффективности ПТЭ ЛА и обоснование выбора показателей безопасности полетов и безотказности ЛА (табл. 2.3, п.1), регулярности отправок в рейсы (табл. 2.3, п.2).

2.4.3. Анализ эффективности ПТЭ ЛА.

формирование исходных данных для анализа эффективности ПТЭ ЛА по показателям безотказности ЛА, безопасности и регулярности полетов для своего варианта (табл. 2.4),

оценка показателей безотказности ЛА, безопасности и регулярности полетов по формулам табл. 2.3 (исходные данные в табл. 2.4):

а) показатели безотказности ЛА, безопасности полетов

количество отказов, выявленных в полете на 1000 ч налета $K_{1000Л}$ (табл. 2.3, п. 1.1),

количество отказов, приведших к инцидентам на 1000 ч налета $K_{1000инц}$ (табл. 2.3, п. 1.2),

суммарное количество отказов и повреждений, выявленных в полете и на земле на 1000 ч налета $K_{1000Сл}$ (табл. 2.3, п. 1.3),

наработка на отказ на j-м уровне управления T_{Oj} (табл. 2.3, п. 1.4),

вероятность не возникновения отказов, приводящих к инцидентам $P_{инц}(t)$ (табл. 2.3, п. 1.4);

б) показатели регулярности полетов

вероятность регулярности отправок ЛА в рейсы с учетом задержек по техническим причинам $P_{P_{om}}(t)$ (табл. 2.3, п. 2.1),

средняя продолжительность задержки вылета по техническим причинам $t_{зcp}$ (табл. 2.3, п. 2.2).

Результаты вычислений представить по форме таблицы 2.5. Сделать выводы о динамике изменения показателей.

Таблица 2.4

Исходные данные для оценки эффективности ПТЭ ЛА по показателям
безотказности ЛА, безопасности и регулярности полетов

Вариант №	Тип ЛА	Год	Исходные данные (обозначения в табл. № 2.3)						
			H	N_{II}	n_{II}	$n_{инц}$	$n_{сj}$	$n_3(t)$	$t_{3, сум}$
0	Ил-96-300	1	1645	210	284	3	803	21	126
	Ил-96-300	2	6136	807	983	11	1705	32	185,6
1	Ил-96-300	3	8655	1154	1667	6	2600	40	220
	Ил-96-300	4	13337	1667	2035	13	3294	62	328,6
2	Ил-96-300	5	16054	2006	2120	7	3182	78	413,4
	Ил-96-300	6	17620	2202	2210	8	3215	79	331,8
3	Ил-96-300	7	14445	1805	1789	8	2785	53	212
	Ил-96-300	8	14450	1762	1878	13	3946	36	154,8
4	Ил-96-300	9	15880	1936	1534	14	3184	38	155,8
	Ил-96-300	10	17362	2530	1371	15	2847	67	261,3
5	RRJ-95	1	13750	8345	1017	28	2033	339	708
	RRJ-95	2	56419	34421	6260	66	9656	688	805
6	В-737	1	112020	23605	4040	54	5160	226	359
	В-737	2	145596	50424	5250	58	6701	312	539
7	В-777	1	74328	9504	6605	117	7850	158	230
	В-777	2	79020	10176	7085	77	8344	141	200
8	А-320	1	248498	114324	12900	137	16595	880	1504
	А-320	2	257304	115356	13438	126	17283	645	935
9	А-321	1	128844	48636	4840	72	6200	369	520
	А-321	2	134784	47616	5066	90	6411	295	560

Таблица 2.5

Показатели безотказности ЛА, безопасности и регулярности полетов

Вариант	Тип ВС	Год	K_{1000II}	$K_{1000инц}$	K_{1000Cj}	T_{Oj}	$P_{инц}(t)$	$P_{Ром}(t)$	t_{3cp}

2.4.4. Анализ распределения отказов и повреждений (подтвердившихся, не подтвердившихся) по функциональным системам ЛА и способам устранения

По исходным данным, приведенным в табл. 2.6, выполнить оценку частных показателей безотказности ЛА- количество отказов на 1000 ч налета K_{1000ji}^{1k} для j -го уровня управления (в полете, суммарно в полете и на земле), для i -й функциональной системы, по l -му признаку (заявленных, подтвердившихся, не подтвердившихся), при k -м способе устранения (устранены на ЛА, сняты с ЛА, сняты с эксплуатации) по формуле

$$K_{1000ji}^{1k} = \frac{n_{ji}^{1k} 1000}{H}, \quad (2.4)$$

Варианты выбрать по последней цифре зачетной книжки, с учетом годового налета H , ч по табл. 2.7.

Результаты расчетов представить в таблице по форме табл. 2.8. Построить гистограммы распределения показателей $K_{1000ji}^{1k}(t)$ по функциональным системам, способам устранения, признаку подтверждения для отказов и повреждений, выявленных в полете и суммарно (в полете и на земле).

2.4.5. Оформить отчет по практическому занятию в соответствии с требованиями, приведенными в п. 1.4.

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2 – 8 часов

Тема: Анализ эффективности процесса технической эксплуатации летательных аппаратов по показателям эффективности использования ЛА по времени.

Цель: Практическое освоение методов анализа эффективности ПТЭ ЛА по показателям эффективности использования ЛА по времени.

3.1. Объект лабораторной работы.

Объектом лабораторной работы являются ПТЭ парка ЛА авиапредприятия, имеющие иерархическую структуру.

3.2. Техническое задание

Лабораторная работа состоит из ряда заданий.

3.2.1. Изучение основных теоретических сведений (п. 2.3) и обоснование иерархической структуры ПТЭ ЛА и системы показателей его эффективности:

определение основных понятий – процессный подход, ПТЭ ЛА, (п. 2.3.1) иерархическая структура ПТЭ ЛА, уровни управления ПТЭ ЛА (п. 2.3.2), эффективность операции, показатель эффективности (п. 2.3.3);

формирование иерархической структуры модели ПТЭ ЛА (п. 2.3.2),

выбор показателей эффективности использования ЛА по времени (п. 2.3.3);

3.2.2. Оценка показателей эффективности использования ЛА по времени (табл. 2.3, п. 3):

формирование исходных данных по табл. 3.1, 3.2 для оценки показателей эффективности использования ЛА по времени (табл. 2.3, п. 3),

оценка коэффициента использования ЛА по времени $K_{иj}$ по формуле табл. 2.3, п. 3.1 по календарным периодам (месяц, квартал, год),

оценка коэффициента исправности ЛА $K_{испj}$ по формуле табл. 2.3, п. 3.2,

оценка удельных простоев ЛА по техническим причинам $K_{пj}$ по формуле табл. 2.3, п. 3.3 для своего варианта.

3.2.3. Анализ эффективности ПТЭ ЛА по показателям эффективности использования ЛА по времени (табл. 2.3 п.3):

формирование исходных данных для анализа эффективности ПТЭ ЛА по показателям эффективности использования ЛА по времени для своего варианта (табл. 3.3);

оценка показателей эффективности использования ЛА по времени по формулам табл. 2.3, п. 3 для исходного варианта;

определение фондов времени непересекающихся подмножеств ЛА и накопленных по уровням управления иерархической структуры ПТЭ ЛА (табл. 2.2);

моделирование показателей эффективности использования ЛА по времени $K_{\text{ин}} = J_l, l = \overline{0,3}$ и $K_{\text{эин}} = I_l, l = \overline{0,3}$ и определение зависимостей коэффициентов использования $J_l(J), l = \overline{0,3}$ и коэффициентов эффективности использования ЛА $I_l(J), l = \overline{0,3}$ от абсолютного коэффициента использования $J = J_3$;

построение зависимостей коэффициентов использования $J_l(J), l = \overline{0,3}$ и коэффициентов эффективности использования ЛА $I_l(J), l = \overline{0,3}$ от абсолютного коэффициента использования $J = J_3$.

Практическое занятие выполняется в соответствии с методическими рекомендациями, приведенными в п. 3.3.

3.3. Методические рекомендации по выполнению практического занятия

3.3.1. Вопросы, рекомендуемые к рассмотрению (ПЗ-2)

1. Дайте определения понятий: процессный подход и ПТЭ ЛА.
2. Что понимается под иерархической структурой ПТЭ ЛА?
3. Какие непересекающиеся подмножества состояний выделяются в ПТЭ ЛА?
4. Какие определены уровни управления ПТЭ ЛА?
5. Что понимается под эффективностью ПТЭ ЛА?
6. Какие виды показателей включает система показателей эффективности ПТЭ ЛА?
7. Какие показатели эффективности ПТЭ характеризуют использование ЛА по времени?
8. Что характеризуют коэффициент использования и коэффициент эффективности использования ЛА?
10. Какие источники информации используются для анализа эффективности использования ЛА?
11. Как осуществляется моделирование показателей эффективности использования ЛА?

Таблица 2.6
Распределение отказов и повреждений по функциональным системам самолета Ил96-300 Авиакомпании за один год

Функциональные системы	Заявлены отказы и повреждения		Подтверждены отказы и повреждения		Способ устранения отказов и повреждений			
	всего, n_{ci}	в полете, n_{Pi}	всего, n_{ci}^p	в полете, n_{Pi}^p	устранены на ЛА, n_{Pi}^y	сняты с ЛА, n_{Pi}^{cl}	сняты с эксплуатации, n_{Pi}^{ce}	не подтверждены, n_{Pi}^H
1	2	3	4	5	6	7	8	9
021 - Кондиционирование воздуха	317	215	157	94	176	152	92	140
022 – Автоматическое управление полетом	664	520	281	219	430	284	54	429
023 – Связное оборудование	202	123	129	77	48	168	2	78
024 – Система электроснабжения	113	58	65	32	65	51	23	47
025 – Бытовое оборудование	149	86	109	64	67	83	8	31
026 – Противопожарное оборудование	29	4	20	3	7	24	10	9
027 – Управление самолетом	249	184	74	49	192	60	30	161
028 – Топливная система	63	36	37	19	49	18	0	28
029 – Гидравлическая система	164	112	146	99	84	84	31	19
030 – Противообледенительная система	124	86	87	60	89	47	18	42
031 - Приборное оборудование	158	91	96	56	79	81	6	56
032 – Шаassi	106	53	82	41	54	54	37	23
033 - Светотехническое оборудование	349	46	338	42	266	87	12	13
034 – Пилотажно-навигационное оборудование	134	96	70	45	38	104	9	71
035 - Кислородное оборудование	12	2	11	2	1	11	0	1

Продолжение табл. 2.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
038 – Водоснабжение и удаление отходов	29	14	21	11	20	9	6	7
049 – Вспомогательная силовая установка	78	9	29	4	58	22	5	49
052 – Двери, люки, створки	107	70	72	47	107	0	0	31
053 – Фюзеляж	17	1	14	1	17	0	0	3
054 – Гандолы, двигатели и пилоны	10	1	10	1	10	0	0	0
055 – Оперение	16	4	14	3	16	0	0	2
056 – Фонарь, окна	43	29	36	24	36	7	4	6
057 – Крыло	38	5	33	3	38	0	1	5
072 – Двигатель	234	60	131	25	194	40	25	88
073 – Топливная двигатель	231	48	161	25	194	40	29	65
075 – Система отбора воздуха	2	1	1	1	1	1	0	1
076 – Система управления двигателем	9	4	5	3	9	0	0	4
077 – Приборы контроля двигателя	420	136	213	60	169	264	50	196
079 – Масляная система	2	0	0	0	2	0	0	2
080 - Система запуска двигателя	53	2	10	0	48	5	3	43
110 – Радиоаппаратура самолетовождения	210	148	142	103	35	198	18	85
113 – Аппаратура опознания и ответа	64	31	31	12	17	55	3	36
142 – Регистрация полетных данных	312	177	183	116	76	249	27	121
144 – Комплекс самолетного ПНО	146	106	98	66	38	117	3	53
Всего	4854	2558	2906	1407	2730	2315	506	1945

Таблица 2.7.

Варианты заданий к табл.2.6

Вариант №	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Налет, ч	17632	17900	16890	16450	17340	18180	16230	18890	15880	18895	17990

3.3.3. Оценка показателей эффективности использования ЛА по времени (табл. 2.3, п. 3), результаты расчетов представить в табл. 3.2 и построить гистограмму K_{Hj} по календарным периодам (месяц, квартал, год):

а) формирование исходных данных по табл. 3.1, 3.2 для оценки коэффициента использования ЛА по времени для своего варианта (табл. 2.3, п.3.1);

оценка коэффициента использования ЛА по календарным периодам (месяц, квартал, год);

б) оценка коэффициента исправности ЛА $K_{испрj}$, $j = \overline{1,3}$ по формуле табл. 2.3, п. 3.2, (варианты заданий приведены в табл. 3.3.) где

$$K_{испрj} = \frac{t_{испрj}}{T_j},$$

где $t_{испрj}$ - суммарное время пребывания парка ЛА в исправном состоянии на j -м уровне управления

T_j - календарный фонд времени парка ЛА на j -м уровне управления

$$t_{испр1} = T_K + T_\Gamma + T_M + T_A,$$

$$T_1 = T_K + T_\Gamma + T_M + T_A + T_E$$

где $T_K, T_E, T_\Gamma, T_A, T_M$ – время пребывания в состояниях К, Е, Г, А, М (табл.3.3);

$$K_{испр1} = \frac{t_{испр1}}{T_1}$$

$$T_2 = T_1 + T_{TO} + T_3 + T_{ДВ} + T_{Д} + T_{Ж} + T_{Л} + T_{В},$$

где $T_{TO}, T_3, T_{ДВ}, T_{Д}, T_{Ж}, T_{Л}, T_{В}$ - время пребывания в состояниях ТО, 3, Дв, Д, Ж, Л, В (табл.3.3);

$$K_{испр2} = \frac{t_{испр1}}{T_2},$$

$$T_3 = T_2 + T_{ОР} + T_P + T_{ЖР} + T_C,$$

где $T_{ОР}, T_P, T_{ЖР}, T_C$ – время пребывания в состояниях ОР, Р, ЖР, С (табл.3.3).

$$K_{испр3} = \frac{t_{испр1}}{T_3};$$

в) оценка удельных простоев ЛА по техническим причинам $K_{Пj}$, $j = \overline{0,3}$ с учетом иерархической структуры ПТЭ ЛА по формуле табл. 2.3, п. 3.3 для своего варианта (табл. 3.3)

Удельные простои ЛА по техническим причинам на j -м уровне управления (табл.3, п.3.3),

$$K_{Пj} = \frac{t_{П сумj}}{H},$$

где $t_{П сумj}$ - суммарные простои парка ЛА по техническим причинам; H - налет парка ЛА .

$$t_{П сум0} = t_k - H,$$

$$\begin{aligned}
t_{\text{Псум1}} &= t_{\text{Псум0}} + T_{\Gamma} + T_{\text{М}} + T_{\text{А}} + T_{\text{Е}}, \\
t_{\text{Псум2}} &= t_{\text{Псум1}} + T_{\text{ТО}} + T_3 + T_{\text{ДВ}} + T_{\text{Д}} + T_{\text{Ж}} + T_{\text{В}} + T_{\text{ПР}} + T_{\text{С}}, \\
t_{\text{Псум3}} &= t_{\text{Псум2}} + T_{\text{ОР}} + T_{\text{Р}} + T_{\text{ЖР}}, \\
K_{\text{П0}} &= \frac{t_{\text{Псум0}}}{H}, \quad K_{\text{П1}} = \frac{t_{\text{Псум1}}}{H}, \\
K_{\text{П2}} &= \frac{t_{\text{Псум2}}}{H}, \quad K_{\text{П3}} = \frac{t_{\text{Псум3}}}{H}.
\end{aligned}$$

3.3.4. Анализ эффективности ПТЭ ЛА по показателям эффективности использования ЛА по времени (табл. 2.3 п.3):

сформировать исходные данные для анализа эффективности ПТЭ ЛА по показателям эффективности использования ЛА по времени для своего варианта по табл. 3.3 и представить их в форме этой таблицы, показать уровни управления U_0, U_1, U_2, U_3 , как в табл. 2.2;

Определить фонды времени (простои) непересекающихся подмножеств ЛА: исправных в рейсе T_0 , исправных в авиапредприятии T_1 , неисправных в авиапредприятии T_2 , неисправных в Центре технического обслуживания и ремонта (авиаремонтном заводе) T_3 по формулам (табл. 2.2)

$$T_0 = T_{\text{К}} - H,$$

где $T_{\text{К}}$ - время пребывания в рейсе,

$$T_1 = T_{\text{К}} + T_{\Gamma} + T_{\text{М}} + T_{\text{А}} + T_{\text{Е}},$$

где $T_{\text{К}}, T_{\Gamma}, T_{\text{М}}, T_{\text{А}}, T_{\text{Е}}$ - время пребывания в состояниях К, Г, М, А, Е (табл. 3.3),

$$T_2 = T_1 + T_{\text{ТО}} + T_3 + T_{\text{ДВ}} + T_{\text{Д}} + T_{\text{Ж}} + T_{\text{Л}} + T_{\text{В}},$$

где $T_{\text{ТО}}, T_3, T_{\text{ДВ}}, T_{\text{Д}}, T_{\text{Ж}}, T_{\text{Л}}, T_{\text{В}}$ - время пребывания в состояниях ТО, 3, ДВ, Д, Ж, Л, В (табл. 3.3),

$$T_3 = T_2 + T_{\text{ОР}} + T_{\text{Р}} + T_{\text{ЖР}} + T_{\text{С}},$$

где $T_{\text{ОР}}, T_{\text{Р}}, T_{\text{ЖР}}, T_{\text{С}}$ - время пребывания в состояниях ОР, Р, ЖР, С (табл. 3.3).

Определить сумму простоев

$$T_{\Sigma} = T_0 + T_1 + T_2 + T_3.$$

Определить коэффициенты простоев в непересекающихся подмножествах состояний по формулам:

$$\begin{aligned}
K_0 &= \frac{T_0}{T_{\Sigma}}, & K_1 &= \frac{T_1}{T_{\Sigma}}, \\
K_2 &= \frac{T_2}{T_{\Sigma}}, & K_3 &= \frac{T_3}{T_{\Sigma}}.
\end{aligned}$$

Определить фонды времени, накопленные по уровням управления иерархической структуры процесса ТЭ ЛА: исправных в рейсе T_{U_0} , исправных в рейсе и исправных в авиапредприятии T_{U_1} , исправных в рейсе, исправных в авиапредприятии и неисправных в авиапредприятии T_{U_2} , исправных в рейсе, исправных в авиапредприятии, неисправных в

авиапредприятия и неисправных в Центре технического обслуживания и ремонта (авиаремонтном заводе) T_{U_3} (табл.2.2) по формулам

$$\begin{aligned} T_{U_0} &= T_K, & T_{U_1} &= T_{U_0} + T_1, \\ T_{U_2} &= T_{U_1} + T_2, & T_{U_3} &= T_{U_2} + T_3. \end{aligned}$$

Выполнить оценку показателей эффективности использования ЛА по времени для исходного варианта по формулам (табл. 3, п. 3)

а) коэффициенты использования (табл.3, п.3.1)
по уровням управления

$$\begin{aligned} J_0 &= \frac{H}{T_{U_0}}, & J_1 &= \frac{H}{T_{U_1}}, \\ J_2 &= \frac{H}{T_{U_2}}, & J_3 &= \frac{H}{T_{U_3}}. \end{aligned}$$

абсолютный коэффициент использования $J = \frac{H}{\Phi} J_3$;

б) коэффициенты эффективности использования (табл. 3, п.3.4)

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{H}{T_{U_0}}, & I_1 &= \frac{T_{U_0}}{T_{U_1}}, \\ I_2 &= \frac{T_{U_1}}{T_{U_2}}, & I_3 &= \frac{T_{U_2}}{T_{U_3}}. \end{aligned}$$

Внести результаты расчетов в табл. 3.4.

3.3.8. Моделирование показателей эффективности использования ЛА по времени $K_{III} = J_l, l = \overline{0,3}$ и $K_{ЭIII} = I_l, l = \overline{0,3}$:

а) зафиксировать значение общего фонда времени Φ ;

б) задать значения абсолютного коэффициента использования для вариантов моделирования $J_l = \overline{0,1;0,6}$ с интервалом 0,05;

в) для каждого значения $J_l = \overline{0,1;0,6}$ определить

налет парка ЛА $H_l = \Phi J_l$,

суммарные простои $T_{\Sigma l} = \Phi - H_l$;

простои в непересекающихся подмножествах состояний

$$T_{0l} = K_0 T_{\Sigma l}, \quad T_{1l} = K_1 T_{\Sigma l},$$

$$T_{2l} = K_2 T_{\Sigma l}, \quad T_{3l} = K_3 T_{\Sigma l}.$$

г) определить фонды времени, накопленные по уровням управления иерархической структуры процесса ТЭ ЛА для моделируемых вариантов

$$T_{U_0l} = T_{0l} + H_l, \quad T_{U_1l} = T_{U_0l} + T_{1l},$$

$$T_{U_2l} = T_{U_1l} + T_{2l}, \quad T_{U_3l} = T_{U_2l} + T_{3l}.$$

д) определить коэффициенты использования для моделируемых вариантов

$$\begin{aligned} J_{0l} &= \frac{H_l}{T_{U_0l}}, & J_{1l} &= \frac{H_l}{T_{U_1l}}, \\ J_{2l} &= \frac{H_l}{T_{U_2l}}, & J_{3l} &= \frac{H_l}{T_{U_3l}}. \end{aligned}$$

е) определить коэффициенты эффективности использования для моделируемых вариантов

$$I_{0l} = \frac{H_l}{T_{U_0l}}, \quad I_{1l} = \frac{T_{U_0l}}{T_{U_1l}},$$

$$I_{2l} = \frac{T_{U_1l}}{T_{U_2l}}, \quad I_{3l} = \frac{T_{U_2l}}{T_{U_3l}}.$$

Внести результаты расчетов в табл. 3.4.

3.3.9. Определить зависимости коэффициентов использования $J_l(J)$, $l = \overline{0,3}$ и коэффициентов эффективности использования ЛА $I_l(J)$, $l = \overline{0,3}$ от абсолютного коэффициента использования $J = J_3$.

3.3.10. Построить зависимости коэффициентов использования $J_l(J)$, $l = \overline{0,3}$ и коэффициентов эффективности использования ЛА $I_l(J)$, $l = \overline{0,3}$ от абсолютного коэффициента использования $J = J_3$.

3.3.11. Оформить отчет по практическому занятию в соответствии с требованиями, приведенными в п. 1.4

С В Е Д Е Н И Я о календарном времени ЛА Авиапредприятия за ** квартал **** года

Таблица 3.3

№ варианта	Тип ВС/ Период	Исправные							Неисправные											
		Всего	В рейсе	Налет*	Обеспечение вылета в базовом аэропорту	В резерве	Простои по метеусловиям и запретам полетов	Не совершавшие полетов	На ТО	Отсутствие ЗПЧ	Отсутствие АД	Доработки по бюллетеням	Рекламации промышленности	Восстановление повреждений	Продление ресурсов и сроков службы	Сертификация экземпляра ЛА	Распределение АП/описание	Ожидание ремонта	В ремонте	Рекламации в адрес ремзаводов ГА
Обозначения	Ф	И	К	Н	Е	Г	М	А	ТО	З	Д _в	Д	Ж	В	Пр	Э	Л/С	Ор	Р	Жр
1. RRJ-95 I кв.	40801	23354	11105	7306	6345	2652	216	3036	3060	2012	-	-	-	12375	-	-	-	-	-	-
2. RRJ-95 II кв.	44093	24962	12937	8511	6173	2646	168	3038	2879	2270	-	-	-	13982	-	-	-	-	-	-
3. RRJ-95 III кв.	44618	24070	12880	8474	6238	2543	89	2320	2009	2722	-	-	-	15817	-	-	-	-	-	-
4. RRJ-95 IV кв.	52927	31001	14486	9530	8611	3215	312	4377	3966	2392	-	-	-	15568	-	-	-	-	-	-
5. RRJ-95 год	182439	103387	51408	33821	27367	11056	785	12771	11914	9396	-	-	-	57742	-	-	-	-	-	-

[illegible]

Таблица 3.6.
Пример расчета и моделирования показателей эффективности использования парка самолетов RRJ-95 Авиакомпаний за ** квартал **** года

J	K ₀	K ₁	K ₂	K ₃											
	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T _Σ	H	Φ	I ₀	I ₁	I ₂	I ₃	J ₀	J ₁	J ₂	J ₃
J_{факт}	17587	51979	79052	0	148618	33821	182439	0,66	0,50	0,57	1	0,66	0,33	0,19	0,19
0,10	19703,41	57468,29	87023,40	0	164195,10	18243,90	182439	0,48	0,40	0,52	1	0,48	0,19	0,10	0,10
0,15	18608,78	54275,60	82188,77	0	155073,15	27365,85	182439	0,60	0,46	0,55	1	0,60	0,27	0,15	0,15
0,20	17514,14	51082,92	77354,14	0	145951,20	36487,80	182439	0,68	0,51	0,58	1	0,68	0,35	0,20	0,20
0,25	16419,51	47890,24	72519,50	0	136829,25	45609,75	182439	0,74	0,56	0,60	1	0,74	0,41	0,25	0,25
0,30	15324,88	44697,56	67684,87	0	127707,30	54731,70	182439	0,78	0,61	0,63	1	0,78	0,48	0,30	0,30
0,35	14230,24	41504,87	62850,24	0	118585,35	63853,65	182439	0,82	0,65	0,66	1	0,82	0,53	0,35	0,35
0,40	13135,61	38312,19	58015,60	0	109463,40	72975,60	182439	0,85	0,69	0,68	1	0,85	0,59	0,40	0,40
0,45	12040,97	35119,51	53180,97	0	100341,45	82097,55	182439	0,87	0,73	0,71	1	0,87	0,64	0,45	0,45
0,50	10946,34	31926,83	48346,34	0	91219,50	91219,50	182439	0,89	0,76	0,74	1	0,89	0,68	0,50	0,50
0,55	9851,71	28734,14	43511,70	0	82097,55	100341,45	182439	0,91	0,79	0,76	1	0,91	0,72	0,55	0,55
0,60	8757,07	25541,46	38677,07	0	72975,60	109463,40	182439	0,93	0,82	0,79	1	0,93	0,76	0,60	0,60

4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3 - 4 часа

Тема: Анализ эффективности процесса технической эксплуатации летательных аппаратов по показателям его экономичности.

Цель: Практическое освоение методов анализа эффективности ПТЭ ЛА по показателям их экономичности.

4.1. Объект лабораторной работы.

Объектом лабораторной работы являются ПТЭ парка ЛА авиапредприятия, имеющие иерархическую структуру.

4.2. Техническое задание.

Лабораторная работа состоит из следующих заданий:

4.2.1. Изучение теоретических сведений (п. 2.3) и рассмотрение иерархической структуры ПТЭ ЛА и системы показателей его эффективности (п. 2.3.2)

рассмотрение иерархической структуры ПТЭ ЛА подмножеств непересекающихся состояний (табл. 3.2) и уровней управления процессом ТЭ ЛА (табл. 2.1, 2.2, рис. 2.1),

выбор показателей экономичности ПТЭ ЛА (табл. 2.3, п. 4) для подмножеств непересекающихся состояний и уровней управления ПТЭ ЛА.

4.2.2. Анализ распределения эксплуатационных расходов для ЛА отечественного и иностранного производства (табл. 4.1),

сравнительная характеристика эксплуатационных расходов для ЛА отечественного и иностранного производства (табл. 4.1).

4.2.3. Оценка показателей экономичности ПТЭ ЛА (табл. 2.3, п. 4) для подмножеств непересекающихся состояний и уровней управления ПТЭ ЛА (табл. 2.1, 2.2, рис. 2.1)

формирование исходных данных по табл. 4.2- 4.4 для оценки показателей экономичности ПТЭ ЛА (табл. 2.3, п. 4) по трудовым затратам для подмножеств непересекающихся состояний и уровней управления ПТЭ ЛА,

формирование исходных данных по табл. 4.3, 4.4 для оценки показателей экономичности ПТЭ ЛА (табл. 2.3, п. 4) по материальным затратам (себестоимости) для подмножеств непересекающихся состояний и уровней управления ПТЭ ЛА,

исходные данные по табл. 4.3, 4.4 формируются следующим образом

оценка обобщенных показателей экономичности ПТЭ ЛА (табл. 2.3, п. 4):

оценка удельных трудовых затрат на техническую эксплуатацию ЛА за год на j-м уровне управления по формуле табл. 2.3, п. 4.1,

оценка удельных материальных затрат на техническую эксплуатацию ЛА за год на j-м уровне управления формуле табл. 2.3, п. 4.2,

оценка удельной себестоимости работ по технической эксплуатации ЛА за год на j-м уровне управления по формуле табл. 2.3, п. 4.3 для своего варианта.

4.2.4. Анализ эффективности ПТЭ ЛА по показателям его экономичности (табл. 2.3 п.4).

формирование исходные данные для анализа эффективности ПТЭ ЛА по частным показателям экономичности для своего варианта (табл. 4.3-4.4),
оценка частных показателей экономичности ПТЭ ЛА и представление результатов в табл. 4.5- 4.6,
построение гистограмм показателей экономичности ПТЭ ЛА по данным табл. 4.5- 4.6.

Работа выполняется в соответствии с методическими рекомендациями, приведенными в п. 4.3.

4.3. Методические рекомендации по выполнению лабораторной работы

4.3.1. Вопросы, рекомендуемые к рассмотрению (ПЗ-3)

1. Дайте определения понятия ПТЭ ЛА.

2. Что понимается под иерархической структурой ПТЭ ЛА?

3. Какие непересекающиеся подмножества состояний выделяются в ПТЭ ЛА?

4. Какие определены уровни управления ПТЭ ЛА?

5. Какие главные цели управления ПТЭ ЛА?

6. Какие виды показателей включает система показателей эффективности ПТЭ ЛА?

7. Какие показатели эффективности ПТЭ ЛА характеризуют экономичность процессов?

8. Что понимается под экономичностью ПТЭ ЛА?

9. Что такое показатель экономичности ПТЭ ЛА?

10. Какие источники информации используются для анализа экономичности ПТЭ ЛА?

11. Что представляют собой частные показатели эффективности ПТЭ ЛА?

12. Какие формулы используются для оценки показателей экономичности ПТЭ ЛА?

4.3.2. Рассмотрение иерархической структуры ПТЭ ЛА и системы показателей его эффективности

рассмотрение иерархической структуры ПТЭ ЛА подмножеств непересекающихся состояний (табл. 3.2):

исправные в рейсе

$$S_0 = (s_1, \dots, s_{r_0}),$$

исправные в авиапредприятии

$$S_1 = (s_{r_0+1}, \dots, s_{r_1}),$$

неисправные в авиапредприятии

$$S_2 = (s_{r_1+1}, \dots, s_{r_2}),$$

неисправные в Центре ТОиР (АРЗ)

$$S_3 = (s_{r_2+1}, \dots, s_r);$$

и уровней управления ПТЭ ЛА (табл. 2.1, 2.2, рис. 2.1):

исправные в рейсе

$$U_0 = (S_0),$$

исправные в рейсе и в авиапредприятии

$$U_1 = (S_0, S_1),$$

исправные в рейсе и в авиапредприятии, неисправные в авиапредприятии

$$U_2 = (S_0, S_1, S_2),$$

исправные в рейсе и в авиапредприятии, неисправные в авиапредприятии
и в Центре ТОиР (АРЗ)

$$U_2 = (S_0, S_1, S_2, S_3);$$

выбор показателей экономичности ПТЭ ЛА (табл. 2.1, п.4) для
подмножеств непересекающихся состояний $\tau_{y\partial j}, c_{My\partial j}, c_{y\partial j}$,

где для

$$S_1 \quad j \in E,$$

$$S_2 \quad j \in TO, B, D,$$

$$S_3 \quad j \in P$$

и уровней управления ПТЭ ЛА

где для

$$U_1 \quad j \in E,$$

$$U_2 \quad j \in E, TO, B, D,$$

$$U_3 \quad j \in E, TO, B, D, P.$$

4.3.3. Анализ распределения эксплуатационных расходов для ЛА
отечественного и иностранного производства (табл. 4.1)

сравнительная характеристика эксплуатационных расходов для ЛА
отечественного и иностранного производства,

построение диаграммы распределения эксплуатационных расходов для
ЛА отечественного и иностранного производства.

4.3.4. Оценка показателей экономичности ПТЭ ЛА (табл. 2.1, п. 4) для
подмножеств непересекающихся состояний и уровней управления ПТЭ ЛА

формирование исходных данных по табл. 4.3, 4.4 для оценки показателей
экономичности ПТЭ ЛА (табл. 2.3, п. 4) по трудовым затратам для
подмножеств непересекающихся состояний

$$\tau_{1\text{сум}} = \tau_E,$$

$$\tau_{2\text{сум}} = \tau_E + \tau_{TO} + \tau_B + \tau_D,$$

$$\tau_{3\text{сум}} = \tau_P$$

и уровней управления ПТЭ ЛА

$$\tau_{U_1\text{сум}} = \tau_{1\text{сум}},$$

$$\tau_{U_2\text{сум}} = \tau_{1\text{сум}} + \tau_{2\text{сум}},$$

$$\tau_{U_3\text{сум}} = \tau_{1\text{сум}} + \tau_{2\text{сум}} + \tau_{3\text{сум}};$$

формирование исходных данных (по табл. 4.2 - 4.4) для оценки показателей экономичности ПТЭ ЛА (табл. 2.3, п. 4) по материальным затратам (себестоимости) для подмножеств непересекающихся состояний

$$C_{1\text{сум}} = C_E,$$

$$C_{2\text{сум}} = C_E + C_{TO} + C_B + C_D,$$

$$C_{3\text{сум}} = C_P$$

и уровней управления ПТЭ ЛА

$$C_{U_1\text{сум}} = C_{1\text{сум}},$$

$$C_{U_2\text{сум}} = C_{1\text{сум}} + C_{2\text{сум}},$$

$$C_{U_3\text{сум}} = C_{1\text{сум}} + C_{2\text{сум}} + C_{3\text{сум}};$$

исходные данные по табл. 4.3, 4.4 формируются следующим образом

$$\tau_E = \tau_{BB} + \tau_{A1} + \tau_{A2} + \tau_{ДР1},$$

$$\tau_{TO} = \tau_{OTO} + \tau_{ПТО},$$

$$\tau_{OTO} = \tau_B + \tau_{B_{\text{нет}}} + \tau_{Xp} + \tau_{ТП} + \tau_{ДР2},$$

$$\tau_{ДР1} = \frac{\tau_E \tau_{ДР}}{\tau_E + \tau_{TO}},$$

$$\tau_{ДР2} = \frac{\tau_{OTO} \tau_{ДР}}{\tau_E + \tau_{TO}},$$

аналогично определяются исходные данные по материальным затратам и себестоимости;

оценка обобщенных показателей экономичности ПТЭ ЛА (табл. 2.3, п. 4):

оценка удельных трудовых затрат на техническую эксплуатацию ЛА за год на j-м уровне управления по формуле табл. 2.3, п. 4.1,

оценка удельных материальных затрат на техническую эксплуатацию ЛА за год на j-м уровне управления формуле табл. 2.3, п. 4.2,

оценка удельной себестоимости работ по технической эксплуатации ЛА за год на j-м уровне управления по формуле табл. 2.3, п. 4.3 для своего варианта.

4.3.5. Анализ эффективности процесса ТЭ ЛА по показателям его экономичности (табл. 2.3 п.4)

формирование исходных данных для анализа эффективности ПТЭ ЛА по частным показателям экономичности для своего варианта (табл. 4.2- 4.4),

оценка частных показателей экономичности ПТЭ ЛА и представление результатов в табл. 4.5,

построение гистограмм показателей экономичности ПТЭ ЛА по данным табл. 4.6- 4.7.

Таблица 4.1

Распределение эксплуатационных расходов

№ п/п	Виды расходов	Расходы по ЛА, проценты		
		Ил-96-300	Б-767	В мире
1	Стоимость парка	5,60	34,00	45,00
2	Экипаж	15,60	14,90	18,00
3	Топливо	44,32	23,56	14,00
4	ТОиР	21,63	21,92	18,00
5	Другие расходы	5,62	5,621	5,00
	Прочие расходы	7,23		
	Итого	100,00	100,00	100,00

4.3.6. Оформить отчет по практическому занятию в соответствии с требованиями, приведенными в п. 1.4.

Таблица 4.2

Варианты заданий для оценки показателей экономической эффективности Авиапредприятия за **** год

№ варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип самолета	АН-24 АН-26 ТУ-154Б	АН-26 ТУ-154Б ТУ-154М	ТУ-154Б ТУ-154М Ту-214	ТУ-154М Ту-214 Ил-62М	АН-24 ТУ-154Б Ту-214	АН-26 ТУ-154М Ил-62М	Ту-214 Ил-62М АН-24	АН-26 Ту-214 ТУ-154М	Ту-214 ТУ-154М АН-24	Ил-62М ТУ-154Б ТУ-154М

Таблица 4.3

Исходные данные по расходам на периодическое ТО (ПТО) парка ЛА Авиапредприятия за **** год

№	Статьи расходов	АН-24	АН-26	ТУ-154Б	ТУ-154М	Ту-214	Ил-62М	Периодическое ТО, всего
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Материальные расходы	3433,5	1067,2	4967,1	11707,5	28339,8	11936,0	61451,3
2	Фонд оплаты труда	8043,3	4548,0	8180,8	13460,2	20468,1	16834,7	71535,0
3	Амортизация основных фондов	627,7	350,8	635,5	1067,9	1589,9	1334,5	5606,3
4	Прочие расходы	8742,5	4751,0	9204,4	14435,6	21710,5	18034,0	76878,1
5	Итого расходы на периодическое ТО, тыс. руб	20847,1	10717,0	22987,8	40671,2	72108,3	48139,3	25470,7
6	Объем работ по ПТО, чел.-ч	28143,6	15930,6	32476,7	50743,7	48512,9	62406,2	238213,7
7	Фактический налет часов, ч	6300,0	355,0	3103,0	9052,0	9524,0	2418,0	20752,0

Исходные данные по расходам на оперативное ТО (ОТО) парка ЛА Авиапредприятия за ***** год

Таблица 4.4

№ № п/п	Статьи расходов	АН-24	АН-26	ТУ-154Б	ТУ-154М	Ту-214	Ил-62М	Оперативное ТО, всего
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Материальные расходы, тыс. руб.	2862,4	466,2	5459,9	5676,3	25654,3	4925,7	45144,8
2.	Фонд оплаты труда, тыс. руб.	9446,2	2498,6	6509,5	18232,7	17321,0	10624,9	64632,8
3.	Амортизация основных фондов, тыс. руб.	46,0	12,2	31,4	88,5	84,7	51,4	314,3
4.	Прочие расходы, тыс. руб.	10766,6	2844,9	7328,1	20593,0	19716,9	12025,2	73274,7
5	Итого расходы на ОТО собственного парка ВС, тыс. руб.	23221,2	5822,0	19328,9	44590,5	62776,9	27627,2	183366,6
6	Объем работ по ОТО собственного парка ВС, чел.-ч в том числе	32225,5	8500,6	27931,9	79274,8	73512,0	47626,2	269080
7	Вылет/встреча (В/В)	1740,8	121,0	2224,2	7091,1	15079,6	2013,0	28269,7
8	Форма А1	4180,8	898,4	3732,2	11263,7	17199,0	8096,1	45370,2
9	Форма А2	4504,9	368,0	1704,3	4841,2	567,2	4908,6	16894,2
10	Форма Б	1512,0	472,6	1651,2	4241,2	6092,4	3671,6	17641,0
11	Форма Б чет.	1207,5	281,5	0,0	559,1	4489,8	3515,1	10053,0
12	Хранение (Хр)	147,9	33,0	111,8	200,1	41,2	169,2	703,3
13	Тех. Помощь (ТП)	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	1,8	2,3
14	Доп. Работы (ДР)	18931,6	6325,6	18508,2	51078,4	30051,8	25250,8	150146,4
15	Расходы, тыс. руб., в том числе:	23221,2	5822,0	19328,9	44590,5	62776,9	27627,2	183366,6
16	Вылет/встреча	1186,0	85,6	1502,2	4832,8	10488,0	1354,8	19449,4
17	Форма А1	2851,4	618,1	2517,9	7729,8	11817,1	5479,8	31014,1
18	Форма А2	3084,4	257,7	1145,1	2393,7	365,4	3113,1	11459,4

Продолжение табл.4.5									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
19	Форма Б	1043,8	333,6	1125,8	2817,3	4214,5	2467,4	12002,4	
20	Форма Б чет.	841,0	191,2	0,0	398,9	3137,1	2344,8	6913,0	
21	Хранение (Хр)	107,7	23,4	77,4	143,3	29,5	124,2	505,5	
22	Тех. Помощь (ТП)	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	1,2	1,5	
23	Доп. Работы (ДР)	19924,9	4332,2	12548,0	34708,9	20429,7	17077,7	102021,3	

Расчет показателей экономичности ПТЭ ЛА
в Авиапредприятии за **** год

№ п/п	Показатели экономичности	Значения показателей для ЛА типа		
		1	2	3
1	2			
1	Удельные трудовые затраты для $S_1 \quad j \in E$, чел.-ч/ч налета			
2	Удельные материальные затраты для $S_1 \quad j \in E$, руб./ч налета			
3	Удельная себестоимость для $S_1 \quad j \in E$, руб./ч налета			
4	Удельные трудовые затраты для $S_2 \quad j \in TO, B, Д$, чел.-ч/ч налета			
5	Удельные материальные затраты для $S_2 \quad j \in TO, B, Д$, руб./ч налета			
6	Удельная себестоимость для $S_2 \quad j \in TO, B, Д$, руб./ч налета			
7	Удельные трудовые затраты для $S_3 \quad j \in P$, чел.-ч/ч налета			
8	Удельные материальные затраты для $S_3 \quad j \in P$, руб./ч налета			
9	Удельная себестоимость для S_3 , $j \in P$ руб./ч налета			
10	Удельные трудовые затраты для $U_1 \quad j \in E$, чел.-ч/ч налета			
11	Удельные материальные затраты для $U_2 \quad j \in E, TO, B, Д$, руб./ч налета			
12	Удельная себестоимость для $U_3 \quad j \in E, TO, B, Д, P$ руб./ч налета			

Таблица 4.6

Расчет показателей экономичности ПТЭ ЛА
по оперативному ТО (ОТО) в Авиапредприятии за **** год

№ п/п	Статьи расходов	Расходы для ЛА типа		
		1	2	3
1	2			
1	Удельные материальные затраты на ОТО, руб./ч налета			
2	Удельный фонд оплаты труда на ОТО, руб./ч налета			
3	Удельная амортизация основных фондов по ОТО, руб./ч налета			
4	Удельные прочие затраты на ОТО, руб./ч налета			
5	Удельные трудовые затраты на ОТО, чел.-ч/ч налета			
6	Удельная себестоимость ОТО, руб./ч налета			
7	Себестоимость 1 чел.-ч работ по ОТО, руб./чел.-ч			

Таблица 4.7

Расчет показателей экономичности ПТЭ ЛА по периодическому ТО (ПТО) в
Авиапредприятии за **** год

№ п/п	Статьи расходов	Расходы для ЛА типа		
		1	1	1
1	2	3	4	5
1	Удельные материальные затраты на ПТО, руб./ч налета			
2	Удельный фонд оплаты труда на ПТО, руб./ч налета			
3	Удельная амортизация ОФ по ПТО, руб./ч налета			
4	Удельные прочие затраты на ПТО, руб./ч налета			
6	Удельные трудовые затраты на ПТО, чел.-ч/ч налета			
7	Удельная себестоимость, на ПТО руб./ч налета			
8	Себестоимость 1 чел.-ч работ по ПТО, руб./чел.-ч			

5 Краткие сведения из теории надёжности

Уровень безопасности полётов (БП) и эффективность (Э) эксплуатации самолётного парка в значительной мере определяются надёжностью, живучестью и эксплуатационной технологичностью систем и агрегатов самолёта и самолёта в целом как сложной системы.

Под надёжностью технического изделия понимают его свойство 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. Надёжность является обобщённым свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения состоит из сочетания свойств безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости [1]. Например, для невосстанавливаемых (неремонтируемых) объектов основным свойством может быть безотказность, а для восстанавливаемых (ремонтируемых) объектов — ремонтпригодность.

Под живучестью [1] понимают свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из-за дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определённого вида, а также при отказе некоторых компонентов. Например, сохранение несущей способности элементами конструкции при возникновении в них усталостных трещин, размеры которых не превышают заданных значений.

Под эксплуатационной технологичностью понимают приспособленность изделия к выполнению работ по его техническому обслуживанию и ремонту.

В качестве обобщённого показателя надёжности системы или изделия в целом принимают вероятность выполнения поставленных задач в установленные сроки и при соблюдении правил эксплуатации. Очевидно, что реализуемая в конкретном изделии надёжность зависит от концепции и качества разработки, культуры производства и последующей грамотной эксплуатации до некоторого предельного состояния.

Одним из частных показателей надёжности системы или изделия в целом является вероятность безотказной работы в течение заданного срока. Отказ системы — это случайное событие ее перехода из работоспособного в неработоспособное состояние.

Появление в процессе эксплуатации дефектов и отказов систем и агрегатов летательного аппарата (ЛА) и обусловленная этим процессом необходимость выполнения большого объёма работ по их предупреждению, выявлению и устранению приводят к увеличению простоев ЛА и сокращению времени его использования по прямому назначению. С другой стороны, этот же процесс определяет существенную часть затрат на техническое обслуживание парка ЛА. Так, значительная по трудоёмкости часть работы инженерно-технического состава авиапредприятий ГА и частей ВВС приходится на выполнение работ, связанных с проверкой исправности, работоспособности и правильности функционирования тех или иных систем и агрегатов ЛА, а также с выявлением возникающих в них неисправностей. Наибольшая часть времени простоя ЛА приходится на поиск неисправного элемента в отказавшей системе.

То и другое вместе взятое (простои и затраты на техническое обслуживание) и определяет, в основном, экономическую эффективность использования самолётного парка.

В то же время подавляющее большинство случаев лётных происшествий или возникновения предпосылок к ним так или иначе также связано с возникновением отказов систем и агрегатов ЛА, т. е. с их недостаточной надёжностью, живучестью и эксплуатационной технологичностью.

Тесная связь показателей надёжности с эффективностью применения самолётного парка свидетельствует о том, что в общем

случае задача нормирования и обеспечения надёжности не может рассматриваться как самостоятельная. Её решение, точно так же, как решение задач по нормированию и обеспечению других характеристик изделия, должно основываться на исследовании эффективности самолётного парка с применением методов оптимизации.

Такая ситуация требует самого пристального внимания к вопросам обеспечения надёжности систем, агрегатов и ЛА в целом, начиная с самых ранних этапов проектирования. Грубые просчеты в обеспечении надёжности на ранних этапах проектирования явились основной причиной прекращения работ по целому ряду проектов ЛА, а в ряде случаев потребовали внесения радикальных изменений в конструкцию ЛА уже в ходе его серийного производства. Степень и качество проработки вопросов надёжности, живучести и эксплуатационной технологичности на этапе проектирования изделия определяют как сложность, длительность и стоимость его доводки, так и, в значительной мере, эффективность его последующей эксплуатации.

В последние годы проблема обеспечения надёжности технических систем всё более выходит на первый план. Сегодня задача обеспечения надёжности рассматривается как важнейший аспект проектирования, а программа обеспечения надёжности становится органической и существенной частью процессов проектирования, испытаний, доводки, производства и эксплуатации изделия.

Обеспечение надёжности включает:

- 1) выявление всех видов возможных отказов изделия и их возможных последствий;
- 2) установление причин отказов;
- 3) планирование и проведение мероприятий, ограничивающих число отказов до приемлемого уровня.

Основные задачи, решаемые для обеспечения надёжности технической системы на этапе проектирования, можно условно разделить на три группы:

1. Проектирование системы с требуемым уровнем надёжности путем проведения:
 - сравнительных оценок различных способов обеспечения надёжности конкретной схемы;

— сравнительного анализа вариантов схем.

2. Обоснование требований по надёжности (нормирование надёжности) к основным элементам проектируемой системы.

3. Выполнение контрольных расчетов надёжности выбранного варианта схемы системы.

Очевидно, каждая из указанных групп задач предполагает существование определенных подходов и методов анализа надёжности технических систем.

6 Общая характеристика метода

Метод структурных схем предназначен для анализа безотказности относительно простых систем и по своей природе принадлежит к формально-математическим методам анализа схемной надёжности. То есть он не рассматривает и не учитывает физическую природу отказов в системе, а оперирует только статистическими (вероятностными) характеристиками потока отказов (такими, как интенсивность потока отказов, параметр потока отказов, наработка на отказ, вероятность безотказной работы и т. п.) Каждый структурный элемент функциональной системы рассматривается здесь как «чёрный ящик», для которого возможны лишь два технических состояния: исправен (работоспособен) или неисправен (неработоспособен), а также известны характеристики индивидуальных потоков отказов элементов.

Таким образом, работа, по существу, ведется со схемой системы и априорными характеристиками надёжности элементов. Такой подход оправдан на ранних стадиях проектирования (когда натурный эксперимент невозможен) для анализа надёжности систем с относительно стабильной элементной базой (дальнейшая отработка отдельных элементов в смысле их надёжности по тем или иным причинам затруднена, а характеристики надёжности элементов известны по результатам массовых испытаний и эксплуатации в составе систем-прототипов). К таким системам относятся пневмо- и гидросистемы на основе унифицированных узлов и агрегатов, топливные системы, электросхемы, радиоэлектрон-

ное оборудование и т. п. В этом случае метод используется как аппарат анализа надёжности в ходе синтеза принципиальной схемы системы (решение вопросов о необходимости дублирования и кратности резервирования элементов) и для сравнительного анализа вариантов принципиальных схем.

В случае использования в системе новых (разрабатываемых параллельно с системой) элементов метод позволяет уточнить или сформулировать вновь технические требования к надёжности (т. е. пронормировать надёжность) этих элементов. Таким образом, рассматриваемый метод может, в принципе, обеспечить решение всех трёх перечисленных групп задач, по крайней мере, на ранних стадиях проектирования.

Ограничения на применение метода вытекают из тех допущений, которые положены в его основу и совокупность которых составляет модель надёжности, рассматриваемую ниже.

7 Модель надёжности

Метод структурных схем базируется на следующих допущениях:

1. ЛА рассматривается как иерархическая система, обладающая конечным числом подсистем, определённой структурой и схемой межсистемных функциональных связей. В качестве подсистем рассматриваются функциональные системы и агрегаты ЛА. Схема межсистемных связей и структура системы заданы однозначно.
2. Каждая система, в свою очередь, рассматривается состоящей из отдельных подсистем и отвечает вышесформулированным требованиям.
3. Для каждого элемента и системы в целом допускаются лишь два возможных технических состояния: работоспособность либо отказ. Всякая возможность частичного функционирования всей системы или её элементов исключается.

4. Предполагается, что все случайные события безотказной работы элементов независимы. То есть отказ одного элемента системы не сказывается на работоспособности (не влечёт отказа) других элементов.
5. Считается, что в каждый момент времени может произойти только один отказ, т. е. вероятность попадания двух или более отказов на один элементарный отрезок времени Δt близка к нулю.
6. Подразумевается, что системы и их элементы перед каждым очередным рабочим циклом (например, полётом) имеют одно и то же стабильно техническое состояние. То есть элементы системы либо не «стареют», либо их свойства полностью восстанавливаются при межполётном обслуживании.
7. Считается, что вероятность отказа любого элемента зависит только от длительности рабочего цикла (например, полёта) и не зависит от его предварительной наработки (например, в предыдущих полётах).
8. Предполагается, что последовательность отказов элементов не влияет на суммарную работоспособность системы (свойство монотонности).
9. Подразумевается, что система состоит (создаётся) преимущественно из «старых» элементов, характеристики безотказности которых известны по опыту их эксплуатации в составе систем-прототипов или по результатам стендовых испытаний.
10. В качестве критерия надёжности системы берётся вероятность $P(\tau)$ безотказной работы за время τ рабочего цикла (например, за время выполнения полётного задания).

Из перечисленных допущений следует, что модель обладает большой широтой, применима к системам различной природы и не требует специальной информации о природе системы и характерах отказов.

Но эти преимущества модели одновременно являются её слабыми местами и накладывают ограничения на её применение.

Действительно, из допущений 1, 2, 3 и 8 следует, что в системе возможно лишь конечное множество технических состояний (булева модель). Очевидно, что допущение может быть справедливым лишь для относительно простых по структуре систем без функциональной избыточности. То есть только для таких систем, где каждый элемент выполняет одну строго определённую функцию и связан с минимальным числом других элементов.

Далеко не всякая система отвечает условию 4. Решая вопрос о применимости метода (модели), необходимо рассмотреть природу, характер и последствия каждого отказа с точки зрения удовлетворения этому допущению, которое одновременно является и основным ограничением на применение метода.

Допущение 7 (марковская модель) также справедливо далеко не для всякой системы и не для всякого периода её эксплуатации. Допущения 4, 5, 6 и 7 в совокупности соответствуют модели простейшего (пуассоновского) потока отказов. Последний же является приемлемой моделью реального потока только на этапе нормальной эксплуатации системы. Как следствие модель (и метод) неприменима для анализа надёжности на этапах приработочных и износовых отказов в системе.

8 Основные этапы оценки безотказности варианта схемы

При использовании метода преследуются следующие цели: получить уравнение надёжности системы (т. е. аналитическую зависимость вероятности безотказной работы $P(\tau)$ системы от показателей безотказности элементов), произвести количественную оценку величины $P(\tau)$ и наметить пути повышения надёжности схемы. При этом в работе можно выделить ряд самостоятельных и относительно независимых этапов:

1. Формирование (или изучение) структуры системы и её основных функций. Определение функций элементов. Уяснение функциональных связей между элементами.

2. Структурный анализ надёжности схемы и построение диаграммы (структурной схемы) безотказной работы.
 3. Вывод уравнения надёжности схемы.
 4. Количественная оценка величины вероятности безотказной работы системы $P(\tau)$.
 5. Выявление слабого в смысле $P(\tau)$ звена схемы.
 6. Внесение изменений в схему с целью повышения $P(\tau)$.
- Ниже рассматриваются методология и содержание работы применительно к каждому из этапов 1–4.

9 Анализ функциональных связей между элементами (этап 1)

Целью данного этапа в анализе надёжности системы является уяснение следующих вопросов:

1. Каково назначение системы и какие конкретно технические задачи она должна решать?
2. Какова структура системы, т. е., из каких элементов она состоит и как эти элементы связаны между собой?
3. Каково назначение каждого элемента?
4. Какого рода отказы возможны в каждом элементе?

То есть на данном этапе уясняются функции системы в целом, роль каждого её элемента в выполнении этих функций, а также характер возможных отказов.

При реальном проектировании новой системы цель эта достигается в ходе проработки структуры системы, т. е. в процессе разработки технического задания на проектирование и разработки её принципиальной, а затем монтажной схемы.

При анализе надёжности заданной схемы, как это имеет место в лабораторных работах, данный этап работы сводится к внимательному изучению схемы и её технического описания. Особое внимание должно быть обращено на природу возможных отказов элементов и соответствие схемы допущению о независимости отказов. Несмотря на кажущуюся простоту, этот этап определяет успех работы в целом.

10 Построение структурной схемы надёжности системы (этап 2)

Структурная схема надёжности, или диаграмма безотказной работы системы — это графическое изображение взаимосвязи событий, состоящих в безотказной работе системы в целом и отдельных её элементов. Диаграмма безотказной работы строится на основе структурного анализа надёжности системы.

Структурный анализ надёжности состоит в выяснении влияния отказов элементов на работоспособность всей системы. На ранних этапах проектирования он основывается на логическом инженерном анализе принципов функционирования системы с учётом функционального назначения элементов и их взаимодействия. То есть в основе такого анализа лежат инженерные представления о работе системы, здравый смысл и поиск ответа на вопрос: «Как поведёт себя система, если отказал элемент i ?».

Цель анализа — ответить на вопрос: «Какие отказы элементов или их комбинации приводят к отказу системы?». Или наоборот: «При каких комбинациях работоспособных элементов сохраняется работоспособность системы?».

Поясним это на упрощённом примере.

Пример. 1 *Провести структурный анализ и построить диаграмму безотказной работы для силовой установки самолёта, состоящей из двух двигателей, с точки зрения надёжности выполнения самолётом боевой задачи.*

Система состоит из двух работающих параллельно элементов (двигателей №1 и №2). Элементы полностью независимы друг от друга, т. е. отказ одного из них не ведёт к отказу другого. Схема позволяет использовать для анализа надёжности метод структурных схем.

С точки зрения успешного выполнения боевой задачи отказ любого из двигателей приводит к её невыполнению. То есть с точки зрения Э отказ любого из двух элементов приводит к отказу системы. И наоборот: система работоспособна с точки зрения Э лишь при безусловной работоспособности обоих элементов.

Если обозначить случайное событие безотказной работы системы через C , а случайные события безотказной работы двигателей соответственно через D_1 и D_2 , то условие нормального функционирования системы можно записать в следующем виде:

$$C = D_1 \cap D_2,$$

где C — есть пересечение событий D_1 и D_2 , или в виде диаграммы безотказной работы:

$$\boxed{C} \rangle \rightarrow \boxed{D_1} \rightarrow \boxed{D_2} , \quad (1)$$

читаемой следующим образом:

Система работает безотказно, если
Двигатель-1 работает безотказно и
Двигатель-2 работает безотказно.

Таким образом, система, состоящая из независимых элементов, связанных функционально так, что отказ любого из них вызывает отказ всей системы, отображается структурной схемой с последовательным сочетанием событий безотказной работы элементов. В общем случае структурная схема надёжности такой системы имеет вид:

$$\boxed{C} \rangle \rightarrow \boxed{A_1} \rightarrow \boxed{A_2} \rightarrow \cdots \rightarrow \boxed{A_n} . \quad (2)$$

Следует обратить внимание на тот факт, что система с физически параллельно работающими элементами отображается в данном случае диаграммой с последовательным сочетанием случайных событий их безотказной работы.

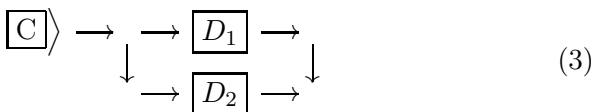
Для одной и той же схемы системы вид диаграммы может быть различным в зависимости от аспекта анализа надёжности, т. е. в зависимости от задачи, которую в данном случае система должна решать.

Поясним это на примере.

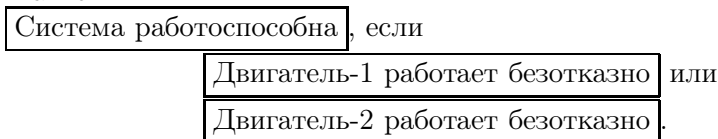
Пример. 2 Провести структурный анализ надёжности и построить диаграмму безотказной работы той же системы, что и в примере 1, с точки зрения обеспечения безопасности полёта.

В случае отказа любого одного из двух двигателей экипаж вынужден прекратить выполнение полётного задания, но имеет возможность вернуться на базу или совершить посадку на запасной аэродром. То есть с точки зрения БП при отказе одного из двух двигателей система в целом остаётся работоспособной. Условием отказа системы с этой точки зрения является одновременный отказ обоих двигателей.

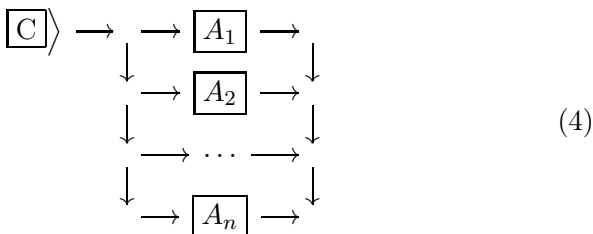
Структурная схема надёжности в этом случае будет иметь вид:



и читаться:

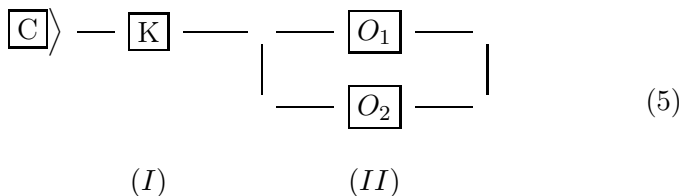


Таким образом, система, состоящая из независимых элементов, связанных функционально так, что изолированный отказ любого из них не вызывает отказа системы, отображается диаграммой безотказной работы с параллельным сочетанием событий безотказной работы элементов. В общем случае структурная схема надёжности такой системы имеет следующий вид:



В самом общем случае структурная схема какой-либо реальной системы может содержать участки как с параллельным, так

и с последовательным сочетанием событий. Например, система пожаротушения, состоящая из командного блока K и двух одинаковых параллельно срабатывающих огнетушителей O_1 и O_2 , каждого из которых заведомо достаточно для ликвидации очага пожара, будет отображаться структурной схемой, приведённой ниже:



В заключение необходимо ещё раз подчеркнуть, что залогом успеха при составлении структурной схемы являются чёткие представления о назначении, структуре и работе системы.

11 Уравнение надёжности системы (схемы) (этап 3)

Уравнением надёжности схемы называется аналитическое выражение вероятности безотказной работы системы через характеристики безотказности её структурных элементов.

Рассмотрим порядок получения уравнения надёжности на уже разработанных примерах 1 и 2.

Предположим, что нам известны вероятности случайных событий безотказной работы двигателей D_1 и D_2 в течение времени выполнения полётного задания. Обозначим эти вероятности через $P(D_1)$ и $P(D_2)$ (в литературе возможны также обозначения $P(D_i)_\tau$, или $P_i(\tau)$, подчёркивающие связь этих вероятностных характеристик с временным интервалом τ), а вероятность безотказной работы системы через $P(C)$ или $P(C)_\tau$, или $P(\tau)$.

Тогда для структурной схемы типа (1) — последовательное сочетание событий, как следует из теории вероятностей:

$$P(C) = P(D_1)P(D_2)$$

или, в общем случае (2) такой схемы:

$$P(C) = \prod_{i=1}^n P(A_i). \quad (6)$$

Если в такой схеме все элементы одинаковые, т. е.

$$P(A_i) = P(A) = \text{const},$$

то

$$P(C) = [P(A)]^n.$$

Заметим, что поскольку $P(A) < 1$, то при последовательном сочетании событий всегда

$$P(C) < P(A),$$

т. е. нельзя получить систему с надёжностью большей, чем надёжность элемента.

Для структурной схемы типа (3) — параллельное сочетание событий,

$$P(C) = P(D_1) \cup P(D_2)$$

или, в общем случае (4) такой системы:

$$P(C) = \bigcup_{i=1}^n P(A_i). \quad (7)$$

Выражение (7) не всегда удобно для работы. Для его дальнейшего преобразования используем следующий искусственный приём.

Введём в рассмотрение события $\overline{D_1}$ и $\overline{D_2}$ дополнительные (т. е. противоположные, дополняющие до полной группы) к событиям D_1 и D_2 . Очевидно, что события $\overline{D_1}$ и $\overline{D_2}$ состоят в отказе соответственно двигателей 1 и 2.

Тогда

$$\overline{C}(\text{отказ двух двигателей}) = \overline{D_1} \cup \overline{D_2}$$

и

$$P(\overline{C}) = P(\overline{D_1})P(\overline{D_2}). \quad (8)$$

Поскольку для полных групп событий

$$P(\overline{C} + C) = P(\overline{C}) + P(C) = 1$$

и

$$P(\overline{D}_i + D_i) = P(\overline{D}_i) + P(D_i) = 1,$$

то с учетом (8)

$$P(\overline{C}) = P(\overline{D}_1)P(\overline{D}_2) = 1 - P(C) = [1 - P(D_1)][1 - P(D_2)].$$

Отсюда

$$P(C) = 1 - [1 - P(D_1)][1 - P(D_2)]$$

или, в общем случае (4) системы с параллельным сочетанием событий:

$$P(C) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(A_i)]. \quad (9)$$

Заметим, что если в такой системе все элементы одинаковы, т. е.

$$P(A_i) = P(A) = \text{const},$$

то

$$P(C) = 1 - [1 - P(A)]^n.$$

Таким образом, параллельное сочетание событий (резервирование элементов) позволяет получить систему с $P(C) > P(A)$, т. е. даёт возможность создать надёжную систему из ненадёжных элементов, что, собственно, часто и является задачей проектирования.

Выражения (6) и (9) дают возможность составить уравнение надёжности в вероятностях для структурной схемы любого вида. Последовательность формирования такого уравнения покажем на примере системы пожаротушения, структурная схема которой рассмотрена выше (5):

$$\boxed{C} \rangle \longrightarrow \boxed{I} \longrightarrow \boxed{II} .$$

Будем рассматривать событие C (система работоспособна), состоящим из последовательного сочетания событий I и II. Событие I

означает работоспособность командного блока К. Сложное событие II означает работоспособность любого из двух или обоих огнетушителей.

Тогда в соответствии с (6)

$$P(C) = \prod_{i=1}^2 P(A_i) = P(I)P(II).$$

Из (9) и учитывая, что $P(O_1) = P(O_2) = P(O)$,

$$P(II) = 1 - \prod_{i=1}^2 [1 - P(O_i)] = 1 - [1 - P(O)]^2.$$

Окончательно

$$P(C) = P(K)\{1 - [1 - P(O)]^2\}.$$

Очевидно, с помощью аналогичных рассуждений можно записать $P(C)$ для сколь угодно сложной структурной схемы.

12 Оценка интенсивности отказов системы через интенсивности отказов элементов

Однако использование выражений (6) и (9) для практических расчётов надёжности обычно затруднено следующим обстоятельством. В практике испытаний и эксплуатации элементов в качестве характеристик их безотказности используются не вероятности $P(A_i)$, а интенсивность потока отказов элементов $\lambda_i(t)$ или параметр потока отказов $\omega_i(t)$.

Физический смысл этих характеристик безотказности проще всего понять из рассмотрения их статистических аналогов $\lambda^*(t)$ и $\omega^*(t)$, наиболее просто определяемых из опыта.

Интенсивность распределения вероятностей отказов (интенсивность потока отказов) $\lambda(t)$ определяется выражением:

$$\lambda(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \lambda^*(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\Delta n_i}{(N - n_i)\Delta t_i}.$$

Здесь N — общее число испытываемых или эксплуатирующихся элементов; Δt_i — интервал времени, для которого оценивается безотказность элементов; n_i — число элементов, отказавших к моменту времени t_i начала интервала Δt_i ; Δn_i — число элементов, отказавших на интервале Δt_i .

При ограниченном объеме испытаний обычно считают

$$\lambda(t) \approx \lambda^*(t).$$

Таким образом, $\lambda^*(t)$ есть частота отказов элементов (отношение числа отказавших элементов к числу поставленных на испытания) в единицу времени на временном интервале Δt_i . Очевидно, использование $\lambda(t)$ в качестве характеристики безотказности элементов особенно удобно при проведении стендовых испытаний, когда отказавшие элементы не восстанавливаются (не ремонтируются и не заменяются), а просто выбывают из испытаний.

В процессе эксплуатации ЛА, когда отказавшие элементы ремонтируются (восстанавливаемый объект), наработки элементов к данному конкретному моменту времени t_i могут существенно различаться (ситуация равносильна испытаниям, в которых элементы начали работать в разное время). В этом случае использование (определение) $\lambda(t)$ в качестве характеристики безотказности затруднено и используется другая характеристика: параметр потока отказов $\omega(t)$, определяемый выражением

$$\omega(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \omega^*(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n}{\sum_{i=1}^N t_i}. \quad (10)$$

Здесь N — общее число однотипных элементов, находившихся в эксплуатации (стоящих на самолётах и стоявших ранее, но снятых вследствие их отказов); n — число элементов из N , отказавших к рассматриваемому моменту времени; t_i — наработка (налёт) элемента к рассматриваемому моменту времени.

Таким образом, $\omega^*(t)$ есть число отказов, приходящееся на единицу времени наработки всего парка элементов. При большом числе эксплуатирующихся элементов обычно считают

$$\omega(t) \approx \omega^*(t).$$

Легко показать, что $\lambda(t)$ и $\omega(t)$ — часто довольно близкие по смыслу и величине характеристики потока отказов. Для этого перепишем выражение (10) в следующем виде:

$$\omega^*(t) = \frac{n}{\sum_{i=1}^N t_i} = \frac{n}{N t_{cp}}.$$

Здесь n — число отказавших элементов; t_{cp} — средний налёт элементов с начала эксплуатации парка.

В то же время, если определять $\lambda^*(t)$ на временном интервале $(0, t_i)$, т. е. за всё время проведения испытаний, то получим при $\Delta n_i = n$, $n_i = 0$ и $\Delta t_i = t_i$

$$\lambda^*(t) = \frac{n}{N t_{cp}}.$$

То есть $\omega^*(t) = \lambda^*(t_{cp})$.

Для элементов со слабо меняющейся функцией $\lambda(t)$, а именно такой характер зависимости имеет место для большинства элементов в период нормальной эксплуатации,

$$\lambda^*(t) \approx \lambda^*(t_{cp}) \approx \text{const.}$$

Тогда можно считать, что

$$\omega(t) \equiv \lambda(t). \quad (11)$$

Это обстоятельство даёт возможность при анализе надёжности использовать $\lambda(t)$ и $\omega(t)$ как равнозначные характеристики, не делая между ними различия.

Заметим также, что параметры $\lambda(t)$ и $\omega(t)$, как и $P(t)$, являются точечными характеристиками надёжности элемента, т. е. характеризуют его безотказность в данный момент времени.

С учетом сказанного целесообразно вместо выражений (6) и (9) получить для обоих вариантов соединения элементов прямые выражения $P(C)$ через $\lambda_i(t)$ или $\omega_i(t)$.

В общем случае (т. е. независимо от реального вида закона функции распределения вероятности безотказной работы во времени) для невозстанавливаемого элемента теория надёжности [2,

с. 40] даёт следующую зависимость между вероятностью его безотказной работы $P(\tau)$ и интенсивностью отказов $\lambda(t)$:

$$P(\tau) = e^{-\int_0^\tau \lambda(t)dt}. \quad (12)$$

Выражение (12) часто называют основной формулой теории надёжности.

Считая время τ (полёта) малым по сравнению с общим временем службы (суммарным налётом) t элемента, а зависимость $\lambda = \lambda(t)$ на отрезке τ пологой и близкой к линейной¹, заменим в (12) $\lambda(t)$ на $\lambda = \lambda_{cp} = \text{const}$. Тогда

$$P(\tau) = e^{-\lambda_{cp}\tau},$$

что совпадает с формой записи вероятности безотказной работы при экспоненциальном законе её распределения

$$P(\tau) = e^{-\lambda\tau}. \quad (13)$$

То есть допущения о малости τ и $\lambda = \text{const}$ равносильны принятию для элемента экспоненциального закона распределения

$$P(t) = F(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Физически это допущение означает, что $P(\tau)$ зависит только от длительности рабочего цикла τ и не зависит от предварительной наработки t . Последнее соответствует ранее сформулированной модели надёжности. Раскладывая выражение (13) в ряд Тэйлора, имеем

$$P(\tau) = e^{-\lambda\tau} = 1 - \lambda\tau + \frac{1}{2}(\lambda\tau)^2 - \dots,$$

или, с учетом малости величин λ и τ ,

$$P(\tau) \approx 1 - \lambda\tau. \quad (14)$$

Выражения (13) и (14) дают возможность непосредственного вычисления $P_i(\tau)$ через интенсивности отказов элементов $\lambda_i(t)$ или,

¹То есть, рассматривая период нормальной эксплуатации элемента.

с учетом (11), — через величины параметров потоков отказов элементов $\omega_i(t)$.

Если теперь подставить выражения (13) и (14) в ранее полученные формулы для безотказности (6) и (9), то мы получаем возможность записать уравнение надёжности непосредственно в интенсивностях отказов элементов.

Для системы типа (2) — последовательное сочетание событий в структурной схеме — получим:

$$P(C) = \prod_{i=1}^n P(A_i) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i \tau} = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i \tau} = e^{-\lambda_{\Sigma} \tau} \approx -\lambda_{\Sigma} \tau + 1,$$

т. е.

$$P(C) = 1 - \lambda_{\Sigma} \tau = 1 - \tau \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (15)$$

Для системы типа (4) — параллельное сочетание событий в структурной схеме — получим:

$$P(C) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(A_i)] = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - e^{-\lambda_i \tau}] = 1 - \prod_{i=1}^n \lambda_i \tau$$

или, окончательно,

$$P(C) = 1 - \tau \tau^{(n-1)} \prod_{i=1}^n \lambda_i. \quad (16)$$

Для дальнейших рассуждений воспользуемся доказываемой в теории надёжности теоремой Чертинцева, которая гласит: *если вероятности отказов достаточно большого числа функциональных элементов, составляющих систему, для малого времени τ изменяются линейно², то вероятность безотказной работы всей системы подчинена экспоненциальному закону*. То есть

$$P(C) = e^{-\tau \lambda_C} \approx 1 - \tau \lambda_C, \quad (17)$$

где λ_C — интенсивность потока отказов системы в целом.

²А такое допущение приемлемо для малого τ при любом законе распределения вероятностей безотказной работы элементов.

Сопоставление выражений (15) и (16) с выражением (17) дает следующее: для структурной схемы типа (2) — последовательное сочетание событий:

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (18)$$

для структурной схемы типа (4) — параллельное сочетание событий:

$$\lambda_C = \tau^{(n-1)} \prod_{i=1}^n \lambda_i. \quad (19)$$

Формулы (17) и (18) являются основными рабочими формулами, т. к. дают возможность сформировать уравнение надёжности схемы непосредственно в интенсивностях отказов элементов.

Так, для ранее рассмотренной структурной схемы пожаротушения (5) уравнение надёжности при прежней логике рассуждений (выделение событий I и II) будет получено следующим образом:

для первого события $\lambda_I = \lambda_K$;

для второго события в соответствии с (19) $\lambda_{II} = \tau \lambda_O^2$;

для системы в целом (последовательное сочетание событий I и II) в соответствии с (18)

$$\lambda_C = \lambda_I + \lambda_{II} = \lambda_K + \tau \lambda_O^2,$$

уравнение надёжности системы в соответствии с (17)

$$P(C) = 1 - \lambda_C \tau = 1 - \tau(\lambda_K + \tau \lambda_O^2) = 1 - \tau \lambda_K - (\tau \lambda_O)^2.$$

Пользуясь той же логикой, очевидно, можно сформировать уравнение надёжности для структурной схемы произвольного вида.

Выполнение следующего этапа, т. е. количественная оценка величины $P_C(\tau)$, очевидно, не представляет принципиальной трудности.

Величина наработки системы на отказ в соответствии с (10) и (11) определяется очевидным соотношением:

$$T_{ОТК}(C) = \frac{1}{\lambda_C}.$$

Практическое задание №4

Метод структурных схем

Цель работы: ознакомление с одним из простейших методов анализа надёжности систем — методом структурных схем — и отработка навыков его применения при проектировании.

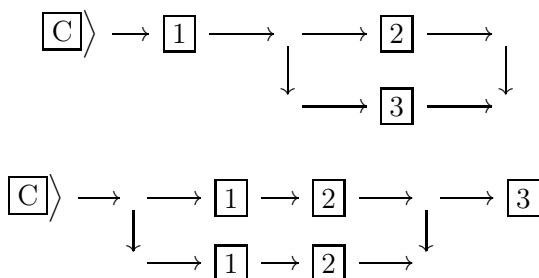
Задачи работы:

1. Уяснить структуру и характер допущений, положенных в основу метода структурных схем, основные ограничения на применение метода, последовательность и содержание основных этапов оценки безотказности системы по данному методу.
2. Ответить на контрольные вопросы.
3. Выполнить расчет безотказности и наработки на отказ заданного варианта структурной схемы.

Контрольные вопросы

1. Какие основные группы задач решаются в процессе анализа и отработки надёжности систем и агрегатов ЛА в процессе проектирования?
2. Учитывает ли метод структурных схем природу и характер отказов элементов?
3. Каков физический смысл допущения о независимости отказов элементов в системе?
4. Учитывают ли модель надёжности и метод структурных схем вероятность одновременного отказа двух и более элементов?
5. Можно ли, в принципе, использовать метод для анализа надёжности статически неопределимой силовой конструкции?
6. В каких случаях характер отказа элемента влияет на возможность применения метода? Привести пример.

7. Можно ли использовать метод для анализа надёжности системы на этапе появления в ней износных отказов, т.е. на этапе её «старения»? Да? Нет? Почему?
8. Прочитайте следующие структурные схемы надёжности систем:



9. Какой структурной схеме соответствует выражение

$$P(C) = P(A_1)P(A_2)P(A_3)?$$

10. Какой структурной схеме соответствует выражение

$$P(C) = P(A_1) + P(A_2) + P(A_3)?$$

11. Какой структурной схеме соответствует выражение

$$P(C) = 1 - [1 - P(A_1)][1 - P(A_2)][1 - P(A_3)]?$$

12. Каков статистический аналог показателя $\lambda(t)$?

13. Каков статистический аналог показателя $\omega(t)$?

14. Почему при анализе надёжности часто не делают разницу между характеристиками $\lambda(t)$ и $\omega(t)$?

15. Какой структурной схеме соответствует запись

$$P(C) = 1 - \tau\tau^2(\lambda_1\lambda_2\lambda_3)?$$

16. Какой структурной схеме соответствует запись

$$\lambda_C = \lambda_1 + \lambda_2 + \tau^2 \lambda_3^3?$$

17. Каким образом связаны между собой параметр потока отказов системы ω_C и величина её наработки на отказ $T_{OTK}(C)$?

Задание

1. Составить уравнение надёжности, оценить величины вероятности безотказной работы $P_\tau(C)$ и наработки на отказ $T_{OTK}(C)$ для заданного варианта структурной схемы при длительности рабочего цикла:

$\tau = 1$ ч (варианты 1–6),

$\tau = 2$ ч (варианты 7–14),

$\tau = 3$ ч (варианты 15–22).

Интенсивности отказов элементов приведены в таблице.

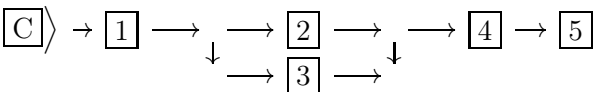
№ элемента	$\lambda_i(t), \text{ч}^{-1}$
1	0,04
2	0,05
3	0,06
4	0,07
5	0,08
6	0,09

2. Письменно ответить на следующие вопросы:

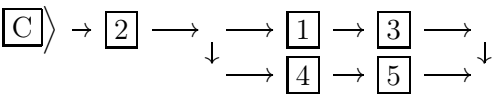
- Можно ли повысить наработку системы на отказ вдвое за счёт повышения надёжности элемента номер 1? Если можно, то какой при этом станет безотказность системы?
- Какой (в пределе) безотказности системы можно добиться таким путём, если возможности совершенствования элемента номер 1 не ограничены?

Варианты структурных схем

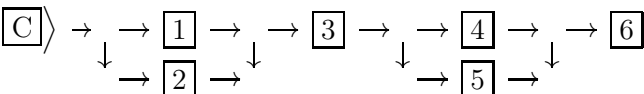
Вариант 1



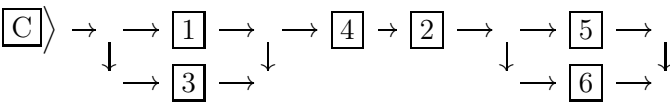
Вариант 2



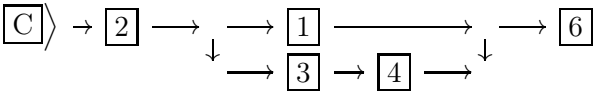
Вариант 3



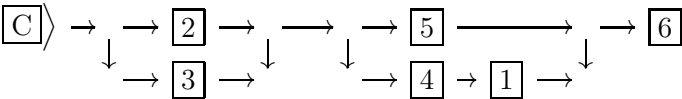
Вариант 4



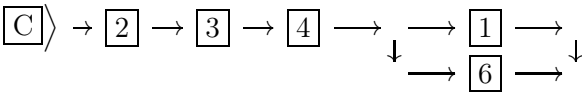
Вариант 5



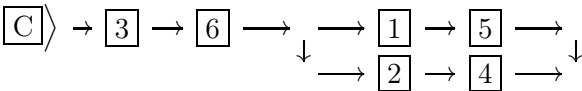
Вариант 6



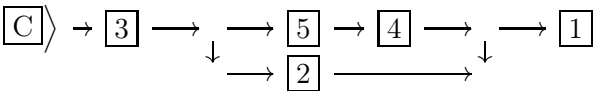
Вариант 7



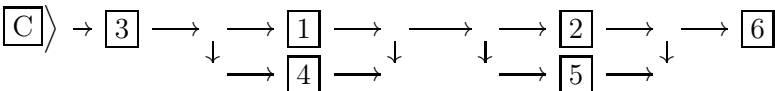
Вариант 8



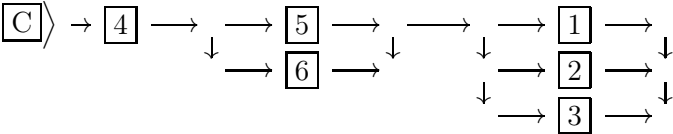
Вариант 9



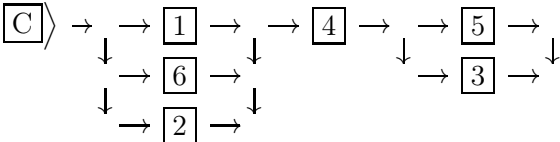
Вариант 10



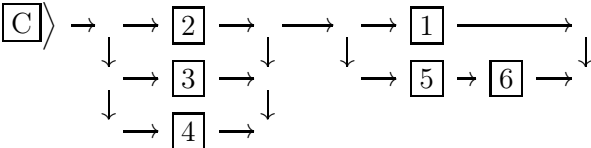
Вариант 11



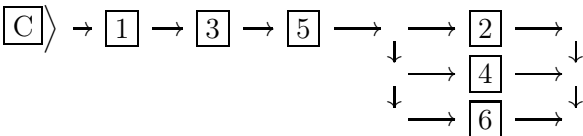
Вариант 12



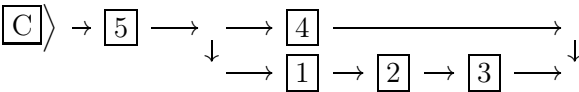
Вариант 13



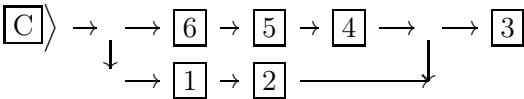
Вариант 14



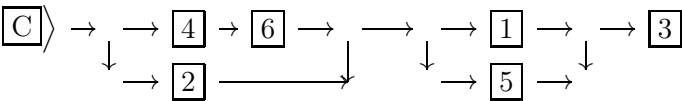
Вариант 15



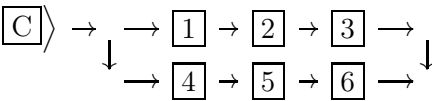
Вариант 16



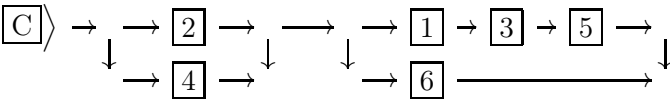
Вариант 17



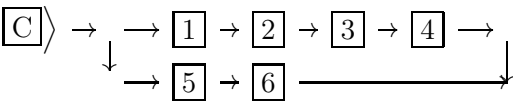
Вариант 18



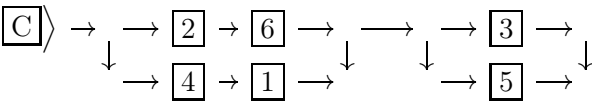
Вариант 19



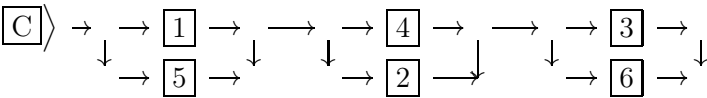
Вариант 20



Вариант 21



Вариант 22



Практическое задание №5

Анализ надёжности системы самолёта на этапе проектирования

Цель работы: приобретение студентами практических навыков анализа надёжности систем самолёта на этапе его проектирования.

Задачи работы:

1. Исследование принципиальной схемы.
2. Составление структурных схем системы и расчёт показателей надёжности.
3. Оценка результатов анализа и усовершенствование принципиальной схемы системы.

Исследование принципиальной схемы. По полученной в задании принципиальной схеме устройства или системы (см. рис. 1–15 в Прил. 1 [3]) и времени полёта студент самостоятельно определяет тип самолёта (если он не определен в задании), основные условия его эксплуатации, решаемые им задачи и анализирует влияние различных типов отказов данной системы в целом на результаты полёта (катастрофа, потеря самолёта, авария, невыполнение задания, вынужденная посадка и т.д.).

Далее проводится анализ возможных отказов каждого элемента системы (обрыв, заклинивание, короткое замыкание и т.д.), их влияние на работоспособность системы и исход полёта. Результаты исследований сводятся в таблицу и обсуждаются с преподавателем.

Составление структурных схем системы и расчёт показателей надёжности. Поскольку одним из условий возможности применения метода структурных схем является наличие у элементов только одного вида отказа, из результатов анализа на первом этапе студент выбирает две комбинации отказов, приводящих к двум наиболее тяжёлым последствиям, и составляет соответствующие структурные схемы.

После проверки структурных схем преподавателем студент проводит расчёт показателей надёжности: вероятности безотказной работы системы за время полёта и наработки на отказ.

Возникновение различного вида отказов каждого элемента принимаем равновероятным в соответствии с таблицей в Прил. 2.

Оценка результатов анализа и усовершенствование принципиальной схемы системы. Как заниженные, так и завышенные показатели надёжности по сравнению с заданными говорят о неоптимальности имеющейся системы. Изменяя степень резервирования или количество элементов в схеме и просчитывая показатели надёжности по изменённой структурной схеме, студент должен добиться соответствия расчётных показателей надёжности системы заданным показателям. Окончательный вариант сдаётся на проверку преподавателю.

Исходным документом при оценке результатов анализа являются «Авиационные правила» [4]. В первом приближении можно воспользоваться условным разбиением самолёта на подсистемы и статистическими данными по наработке на отказ по таблице в Прил. 3. Для случаев аварии (потери самолета) и катастрофы наработка на отказ увеличивается на два и три порядка соответственно.

Библиографический список

1. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Введ. с 01.07.90.
2. *Анцилович Л. Л.* Надёжность, безопасность и живучесть самолёта: Учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. «Самолётостроение». — М.: Машиностроение, 1985. — 296 с.
3. Лабораторные работы по курсу «Надёжность, живучесть и эксплуатация самолётов»/ сост. *Л. Л. Анцилович, Ю. Н. Егоров, А. И. Ендогур, В. А. Маслов.* — М.: МАИ, 1984 — 37 с.
4. Авиационные правила. Ч. 25. Нормы лётной годности самолётов транспортной категории/ гл. ред. *Л. М. Берестов*, отв. ред. *А. Н. Степаненко.* — Жуковский: Лётно-исследовательский институт им. М. М. Громова, 1994. — 322 с.

Приложение 1. Принципиальные схемы систем

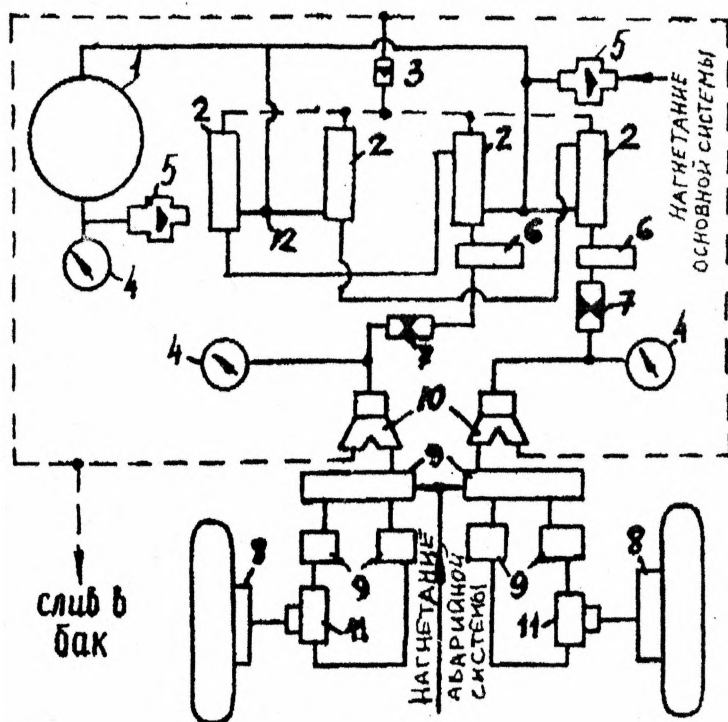


Рис. 1. Схема гидравлической системы торможения колес:

- 1 — гидроаккумулятор; 2 — редукционный клапан; 3 — обратный клапан; 4 — манометр; 5 — зарядный штуцер; 6 — выключатель гидравлический; 7 — дроссель; 8 — тормозная камера; 9 — гидрошарниры; 10 — электрогидравлический кран; 11 — челночный клапан; 12 — соединение трубопроводов

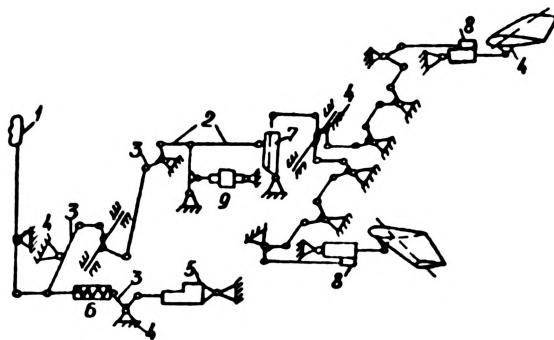


Рис. 2. Схема канала тангажа системы управления: 1 — ручка управления; 2 — тяга; 3 — качалка; 4 — кронштейн; 5 — механизм триммерного эффекта; 6 — загрузочный механизм; 7 — АРУ; 8 — бустер; 9 — рулевая машина автопилота

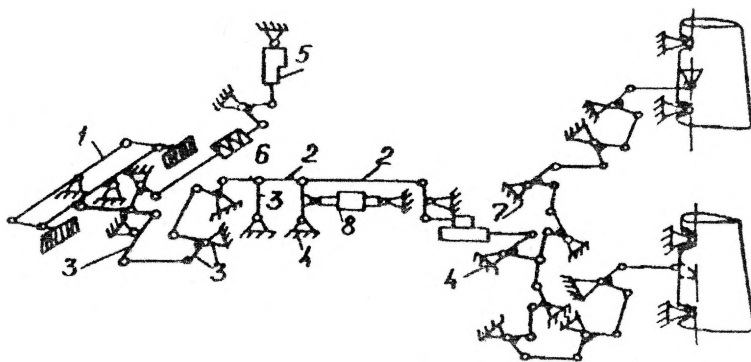


Рис. 3. Схема канала управления рулями направления: 1 — ножной пост управления; 2 — тяга; 3 — качалка; 4 — кронштейн; 5 — механизм триммерного эффекта; 6 — загрузочный механизм; 7 — бустер; 8 — рулевая машина автопилота

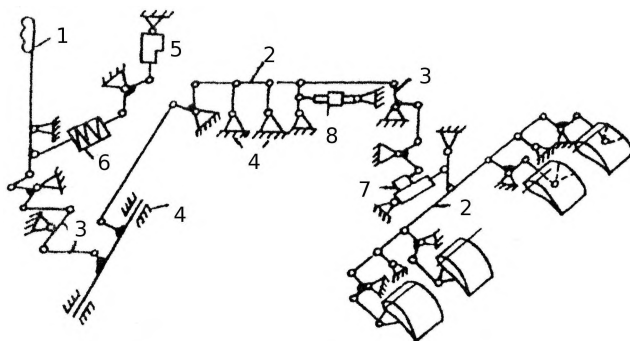


Рис. 4. Схема канала крена системы управления: 1 — ручка управления; 2 — тяга; 3 — качалка; 4 — кронштейн; 5 — механизм триммерного эффекта; 6 — загрузочный механизм; 7 — бустер; 8 — рулевая машина автопилота

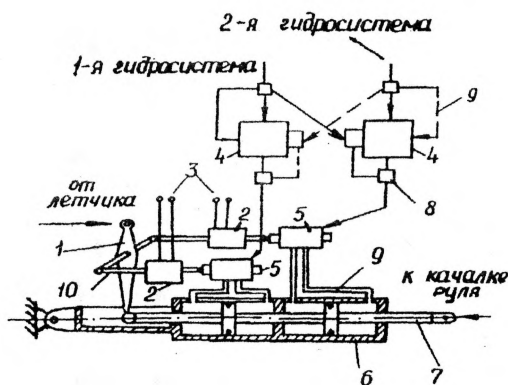


Рис. 5. Схема питания камер двухкамерного гидроусилителя: 1 — входной рычаг; 2 — пружинные тяги; 3 — электросигнализация заклинивания золотника; 4 — клапаны переключения гидросистем; 5 — золотниковый распределитель; 6 — цилиндр гидроусилителя; 7 — шток с поршнями; 8 — соединение трубопроводов; 9 — трубопроводы; 10 — жёсткие тяги

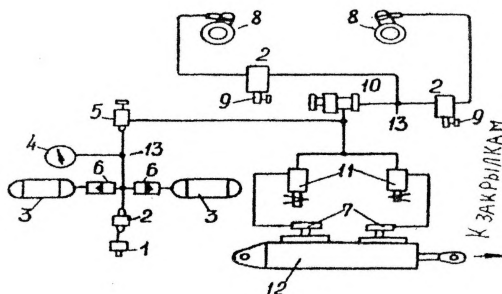


Рис. 6. Схема воздушной системы управления закрылками: 1 — зарядный штуцер; 2 — фильтр; 3 — воздушный баллон; 4 — манометр; 5 — кран; 6 — обратный клапан; 7 — золотниковый распределитель; 8 — компрессор; 9 — стравливающий клапан; 10 — автомат давления; 11 — электромагнитный клапан; 12 — воздушный цилиндр; 13 — соединение трубопроводов

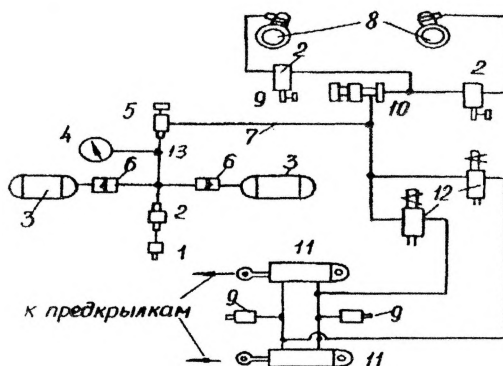


Рис. 7. Схема воздушной системы управления предкрылками: 1 — зарядный штуцер; 2 — фильтр; 3 — воздушный баллон; 4 — манометр; 5 — кран; 6 — обратный клапан; 7 — трубопровод; 8 — компрессор; 9 — стравливающий клапан; 10 — автомат давления; 11 — воздушный цилиндр; 12 — электромагнитный клапан; 13 — соединение трубопроводов

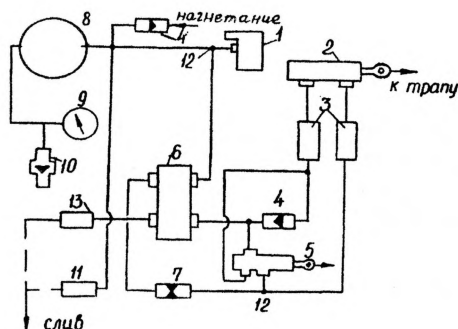


Рис. 8. Магистраль выпуска и уборки бортового трапа: 1 — реле давления; 2 — гидроусилитель; 3 — гидрошарнир; 4 — обратный клапан; 5 — гидроцилиндр замка трапа; 6 — электромагнитный клапан; 7 — дроссель; 8 — гидроаккумулятор; 9 — манометр; 10 — зарядный штуцер; 11 — стравливающий клапан; 12 — соединение трубопроводов; 13 — сливной кран

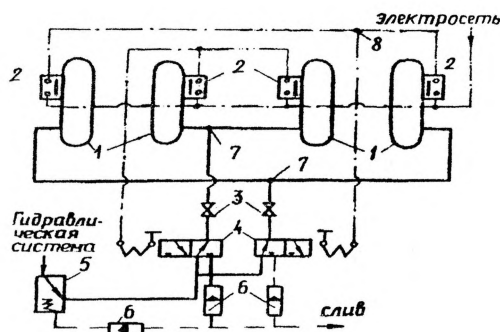


Рис. 9. Принципиальная схема тормозной системы: 1 — тормозное колесо; 2 — инерционный датчик автомата торможения; 3 — дроссель; 4 — электромагнитный кран автомата торможения; 5 — редукционный клапан торможения; 6 — обратный клапан слива; 7 — соединение трубопроводов; 8 — соединение электросети

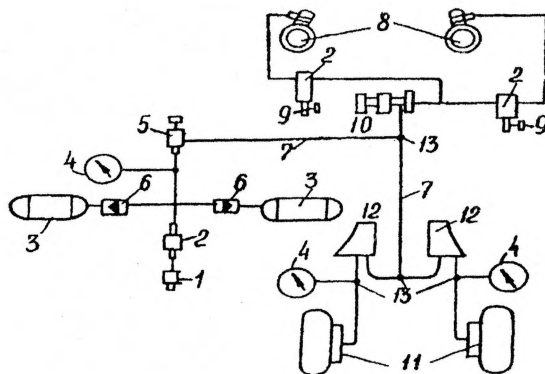


Рис. 10. Схема воздушной системы торможения колес: 1 — зарядный штуцер; 2 — фильтр; 3 — воздушный баллон; 4 — манометр; 5 — электрогидравлический кран; 6 — обратный клапан; 7 — трубопровод; 8 — компрессор; 9 — фильтр; 10 — автомат давления; 11 — тормозная камера; 12 — редукционный клапан; 13 — соединение трубопроводов

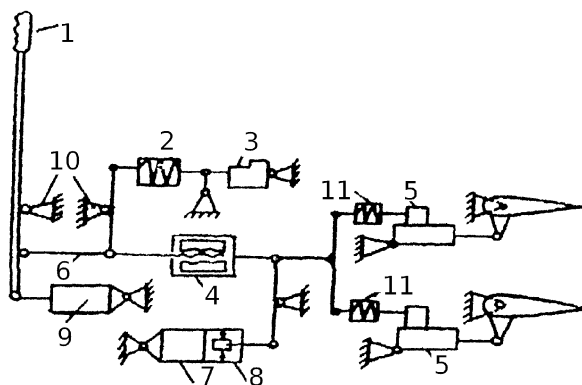


Рис. 11. Принципиальная схема системы управления сверхзвукового самолёта: 1 — ручка управления; 2 —загрузочное устройство; 3 — механизм триммерного эффекта; 4 — исполнительный механизм системы улучшения устойчивости и управляемости; 5 — гидроусилитель; 6 —жёсткая тяга; 7 — исполнительный механизм системы траекторного управления; 8 — механизм отключения исполнительного механизма; 9 — механизм ограничения предельных режимов; 10 — кронштейны; 11 — пружинная тяга

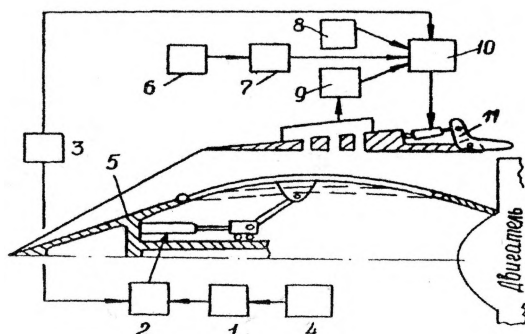


Рис. 12. Схема регулирования сверхзвукового воздухозаборника:

1 — датчик числа M в горле; 2 — регулятор центрального тела; 3 — ручное управление; 4 — датчик помпажа; 5 — центральное тело с механизмом регулировки; 6 — датчик «срыва»; 7 — система управления запуском; 8 — датчик числа M полета; 9 — датчик положения скачка; 10 — регулятор перепускных створок; 11 — перепускные створки с механизмом управления

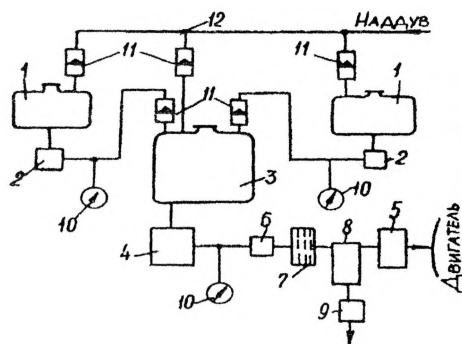


Рис. 13. Схема насосной подачи топлива к двигателю: 1 — топливные баки; 2 — перекачивающие насосы; 3 — расходный бак; 4 — самолетный подкачивающий насос; 5 — двигательный подкачивающий насос; 6 — отсечной клапан; 7 — фильтр; 8 — отстойник; 9 — сливной клапан; 10 — манометры; 11 — обратный клапан; 12 — соединение трубопроводов

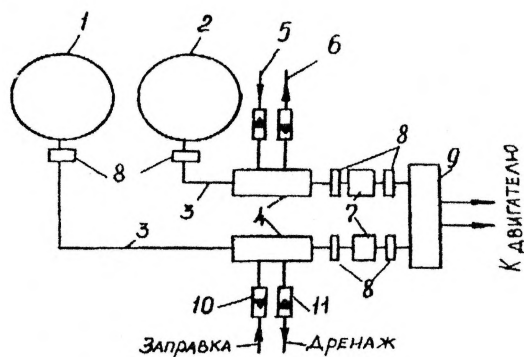


Рис. 15. Принципиальная схема топливной системы двухкомпонентного стартового ускорителя: 1 — бак горючего; 2 — бак окислителя; 3 — магистральный трубопровод; 4 — отсечной клапан; 5 — заправочный трубопровод; 6 — дренажный трубопровод; 7 — сифон; 8 — фланцевые соединения; 9 — турбонасосный агрегат; 10 — обратный клапан; 11 — дренажный клапан

Приложение 2. Параметры потока отказов элементов систем

Наименование элемента	$\omega \times 10^6, \text{ч}^{-1}$
1. Общие элементы систем	
Ручка управления	0,2
Ножной пост управления	0,3
Исполнительный механизм системы	5,0
улучшения устойчивости и управляемости	
Исполнительный механизм системы	4,0
траекторного управления	
Механизм отключения исполнительного	1,0
механизма	
Механизм ограничения предельных	2,0
режимов	
Механизм триммерного эффекта	1,0
Загрузочное устройство	0,5
Автомат регулирования усилий	2,5
Рулевая машина автопилота	3,0
Тормозная камера	0,4
2. Элементы гидравлической системы	
Гидроусилитель	5,0
Цилиндр гидроусилителя	0,5
Золотниковый распределитель	2,0
Шток с поршнями	0,2
Реле давления	0,6
Гидроаккумулятор	0,5
Гидрошарнир	1,0
Клапан переключения гидросистемы	0,2
Выключатель гидравлический	0,1
Челночный клапан	0,3
Дроссель	0,2
Обратный клапан	0,5
Зарядный штуцер	0,1
Редукционный клапан	0,2
Манометр гидравлический	0,05
Сливной кран	0,05
Стравливающий клапан	0,2
Трубопровод гидросистемы, 1 м погонный	0,01
Соединение трубопроводов гидросистемы	0,1

Продолжение	
Наименование элемента	$\omega \times 10^6, \text{ч}^{-1}$
3. Элементы воздушной системы	
Автомат давления	2,2
Воздушный баллон	1,5
Воздушный цилиндр	1,5
Золотниковый распределитель воздушного цилиндра	2,0
Воздушный фильтр	1,0
Стравливающий клапан	0,8
Зарядный штуцер	0,3
Обратный клапан	0,5
Манометр воздушный	0,2
Редукционный клапан	1,0
Воздушный трубопровод, 1 м погонный	0,02
Соединение воздушных трубопроводов	0,2
4. Элементы электросистемы	
Электрогидравлический кран	0,5
Электромагнитный клапан	0,5
Инерционный датчик автомата торможения	0,4
Электросигнализация заклинивания золотника	0,3
Соединение электросети	0,05
5. Тяги, кронштейны, рычаги	
Жесткая тяга	0,05
Пружинная тяга	0,1
Кронштейн	0,04
Входной рычаг	0,05
Качалка	0,05
6. Система управления воздухозаборником	
Система управления запуском	10,0
Центр. тело с механизмом регулировки	8,0
Регулятор центрального тела	1,5
Ручное управление	2,0
Перепуск. створки с механизмом управл.	2,0
Регулятор перепускных створок	1,5
Датчик числа М в горле	0,8
Датчик числа М полета	0,5
Датчик положения скачка	1,0
Датчик помпажа	0,5
Датчик «срыва»	1,0

Наименование элемента	Окончание
	$\omega \times 10^6, \text{ч}^{-1}$
7. Топливная система, система запуска двигателя	
Топливные баки	5,0
Перекачивающие насосы	2,0
Расходный бак	3,0
Самолетный подкачивающий насос	2,0
Двигательный подкачивающий насос	2,0
Бак горючего	5,0
Бак окислителя	10,0
Турбонасосный агрегат	20,0
Насос рабочего топлива	10,0
Насос пускового топлива	12,0
Аккумуляторная батарея	1,0
Кислородный баллон	0,5
Кислородный редуктор	1,0
Форсунка рабочего топлива	0,5
Форсунка пускового топлива	0,5
Форсунка кислородная	0,5
Кислородный электрокран	2,5
Корпус пускового воспламенителя	0,05
Отсечной клапан	0,1
Фильтр	1,0
Отстойник	0,5
Сливной кран	0,8
Манометр	0,05
Обратный клапан	0,1
Магистральный трубопровод	0,1
Заправочный трубопровод	0,05
Дренажный трубопровод	0,05
Соединение трубопроводов	0,5
Сильфон	0,5
Фланцевое соединение	0,1
Дренажный клапан	0,2
Кнопка запуска	0,01
Электропредохранитель	0,5
Катушка напряжения	0,8
Свеча электрозажигания	1,0

Приложение 3. Нарботка на отказ подсистем самолёта

Подсистема	Нарботка на отказ, приведшая к невыполнению задания $\times 10^{-6}$, ч
1. Планер:	
- крыло	8,6
- фюзеляж	6,9
- оперение	8,7
2. Силовая установка:	
- двигатели (с воздухозаборником и системой выхлопа)	0,65
- топливная система	0,1
- система запуска	6,8
3. Взлётно-посадочные устройства:	
- шасси	0,08
- механизация	0,1
4. Система управления	0,3
5. Пилотажно-навигационное оборудование	3,4
6. Электрооборудование	0,5
7. Радиотехническое оборудование	0,6
8. Энергосистема:	
- гидросистема	0,9
- ВСУ	4,4
9. Система жизнеобеспечения:	
- кондиционирование	1,1
- кислородная система	3,4
10. Система защиты:	
- ПОС	6,8
- противопожарная система	8,6
11. Прочие системы	0,2

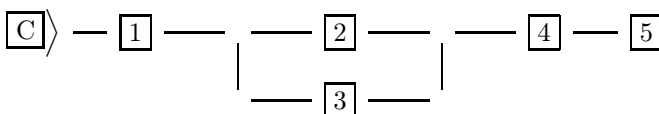
**Примеры выполнения
практических работ № 4-5**

1 Метод структурных схем

1.1 Задание

1. Составить уравнение надёжности, оценить величины вероятности безотказной работы $P_\tau(C)$ и наработки на отказ $T_{OTK}(C)$ для заданного варианта структурной схемы при длительности рабочего цикла: $\tau = 1$ час.

Вариант структурной схемы:



Интенсивности отказов элементов приведены в таблице.

NN элемента	Интенсивность отказа $\lambda_i(t)$, час ⁻¹
1	0,04
2	0,05
3	0,06
4	0,07
5	0,08
6	0,09

2. Письменно ответить на следующие вопросы:

- Можно ли повысить наработку системы на отказ вдвое за счёт повышения надёжности элемента номер 1? Если можно, то какой при этом станет безотказность системы?
- Какой (в пределе) безотказности системы можно добиться таким путём, если возможности совершенствования элемента номер 1 не ограничены?

1.2 Выполнение задания

1. Уравнение надёжности системы, выраженное через интенсивности потока отказов элементов:

$$\lambda_C = \lambda_1 + \tau \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5.$$

Подставляем заданные числовые значения:

$$\lambda_C = 0,04 + 1 \times 0,05 \times 0,06 + 0,07 + 0,08 = 0,193\text{ч}^{-1}.$$

Вероятность безотказной работы вычисляем по формуле:

$$P_\tau(C) = 1 - \tau\lambda_C = 1 - 1 \times 0,193 = 0,807$$

Наработка на отказ:

$$T_{OTK}(C) = \frac{1}{\lambda_C} = \frac{1}{0,193} = 5,18\text{ч}.$$

2. Вторая часть задания включает два взаимосвязанных вопроса. Целесообразно начать со второго вопроса.

2.2. В пределе элемент номер 1 безотказный, т. е. $\lambda_1 = 0$.

Подставляем это значение в уравнение надёжности системы, выраженное через интенсивности потока отказов элементов:

$$\lambda_C = 1 \times 0,05 \times 0,06 + 0,07 + 0,08 = 0,153\text{ч}^{-1}.$$

Вероятность безотказной работы вычисляем по формуле:

$$P_\tau(C) = 1 - \tau\lambda_C = 1 - 1 \times 0,153 = 0,847$$

Наработка на отказ:

$$T_{OTK}(C) = \frac{1}{\lambda_C} = \frac{1}{0,153} = 6,54\text{ч}.$$

2.1. Вероятность безотказной работы и наработка на отказ увеличились, но не в два раза, следовательно, увеличить наработку на отказ вдвое за счёт доработки элемента номер 1 нельзя.

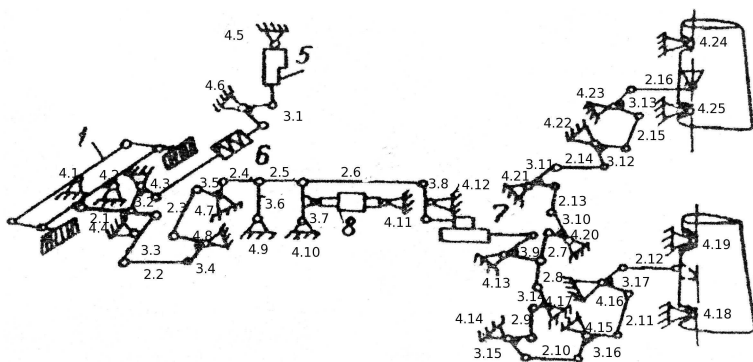
2 Анализ надёжности системы

Выдано задание по источнику [2, рис. 4].

2.1 Исследование принципиальной схемы

2.1.1 Анализ и дополнение исходных данных

Принципиальная схема системы управления по курсу (рис.1).



1 — ножной пост управления; 2 — тяга; 3 — качалка; 4 — кронштейн; 5 — механизм триммерного эффекта; 6 — загрузочный механизм; 7 — бустер; 8 — рулевая машина автопилота.

Рисунок 1— Схема канала управления рулями направления

В составе системы управления кронштейнов 4 — 25 шт., качалок 3 — 17 шт., тяг 2 — 16 шт.

Назначение системы [3]: обеспечение необходимой эффективности путевого управления.

Возможные функциональные отказы [3]:

- уменьшение эффективности управления по курсу;
- увеличение эффективности управления по курсу;
- самопроизвольное перемещение одного или обоих рулей направления;
- изменение управляющих усилий;
- возникновение колебаний одного или обоих рулей направления.

Принимаем тип самолёта МиГ-29.

Профиль полёта: полёт по замкнутому маршруту, выполнение фигуры «бочка» на одном из участков маршрута.

Ожидаемые условия эксплуатации: полёт над безлюдной местностью в простых метеоусловиях в дневное время. Высота полёта 5 км, протяжённость маршрута 600 км, продолжительность полёта $\tau = 1$ ч.

2.1.2 Анализ отказов элементов

Эл-т	Наименование элемента	$\omega \times 10^6, \text{час}^{-1}$	Отказ элемента	Отказ системы
1	2	3	4	5
1	Ножной пост управления	0,3	Заедание в шарнире	Увеличение управл. усилия
2	Тяга	0,05	Заедание в шарнире	Увеличение управл. усилия
3	Качалка	0,05	Заедание в шарнире	Увеличение управл. усилия
4	Кронштейн	0,04	Заедание в шарнире	Увеличение управл. усилия
5	Механизм триммерного эффекта	1,0	Уход электро-механизма в крайнее положение	Увеличение управл. усилия
6	Загрузочное устройство	0,5	Заедание в шарнире	Увеличение управл. усилия
7	Гидро-усилитель	5,0	Обрыв гидро-питания	Увеличение управл. усилия
8	Рулевая машина автопилота	3,0	Обрыв цепи электро-питания или управления	Отказ автопилота

При анализе отказов элементов системы управления по курсу приняты следующие допущения по отказам и ожидаемым условиям эксплуатации:

1. Заклинивание и рассоединение в шарнирах, для принятой системы технического обслуживания и ремонта, события практически невероят-

ные.

2. Рулевая машина автопилота 8 представляет собой электропривод, присоединённый к поддерживающей качалке 3.7. При отказе автопилота проводка системы управления блокируется.

3. Гидроусилитель 7 (бустер) подключен по обратимой схеме и при отказе работает как качалка.

4. Увеличение управляющего усилия оцениваем как:

$$[P_n]_п < P_n \leq [P_n]_к,$$

где P_n — усилие пилота, приложенное к педалям для отклонения рулей направления; $[P_n]_п = 9,0 \text{ даН}$ — допускаемое продолжительное усилие на педали; $[P_n]_к = 70,0 \text{ даН}$ — допускаемое кратковременное усилие на педали.

5. Усилие на педалях не может быть снято координированным отклонением других рулевых поверхностей.

6. Для выполнения полётного задания необходима исправная работа канала путевого управления.

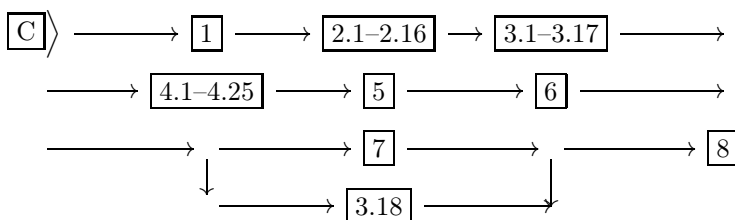
Для принятых допущений нарушены предельные ограничения, следовательно особая ситуация может быть классифицирована как аварийная.

2.1.3 Контрольный уровень наработки на отказ

По [2, табл. 1] наработка на отказ для аварийной ситуации:

$$[T_{\text{ОТК}}] = 0,3 \cdot 10^7 \text{ ч.}$$

2.2 Структурная схема



Уравнение надёжности:

$$\begin{aligned} \omega_C &= \omega_1 + 16\omega_2 + 17\omega_3 + 25\omega_4 + \omega_5 + \omega_6 + \tau\omega_7\omega_{3.18} + \omega_8 = \\ &= 10^{-6} \cdot (0,3 + 16 \cdot 0,05 + 17 \cdot 0,05 + 25 \cdot 0,04 + 1,0 + 0,5 + \\ &+ 1,0 \cdot 5,0 \cdot 0,05 \cdot 10^{-6} + 3,0) = 6,45 \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч.} \end{aligned}$$

Наработка на отказ

$$T_{\text{ОТК}} = \frac{1}{\omega_C} = \frac{1}{6,45 \cdot 10^{-6}} = 0,155 \cdot 10^6 \text{ч}$$

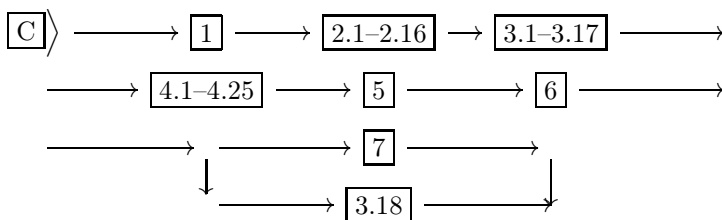
2.3 Оценка результатов анализа

Условие надёжности:

$$T_{\text{ОТК}} (= 0,0155 \cdot 10^7 \text{ч}) \geq [T_{\text{ОТК}}] (= 0,3 \cdot 10^7 \text{ч}),$$

не выполняется, следовательно необходима доработка системы.

1. Заменяем качалку 3.7 с обычной поддерживающей на суммирующую, тогда рулевая машина автопилота при отказе не будет блокировать проводку системы управления. Структурная схема в этом случае будет выглядеть следующим образом:



Уравнение надёжности:

$$\begin{aligned} \omega_C &= \omega_1 + 16\omega_2 + 17\omega_3 + 25\omega_4 + \omega_5 + \omega_6 + \tau\omega_7\omega_{3.18} = \\ &= 10^{-6} \cdot (0,3 + 16 \cdot 0,05 + 17 \cdot 0,05 + 25 \cdot 0,04 + 1,0 + 0,5 + \\ &+ 1,0 \cdot 5,0 \cdot 0,05 \cdot 10^{-6}) = 3,45 \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}. \end{aligned}$$

Наработка на отказ

$$T_{\text{ОТК}} = \frac{1}{\omega_C} = \frac{1}{3,45 \cdot 10^{-6}} = 0,29 \cdot 10^6 \text{ч}$$

2. Доработаем механизм триммерного эффекта таким образом, чтобы $\lambda_5 = 0,2 \cdot 10^{-6} 1/\text{ч}$, тогда $\omega_C = 3,15 \cdot 10^{-6} 1/\text{ч}$, а наработка на отказ $T_{\text{ОТК}} = 0,32 \cdot 10^6 \text{ч}$, условие надёжности выполняется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Эффективность процессов эксплуатации летательных аппаратов. Учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 2011. – 119 с.
2. Ицкович А.А., Файнбург И.А., Файнбург Г.Д., Эффективность процессов технической эксплуатации летательных аппаратов: учебно- методическое пособие по изучению дисциплины и выполнению контрольной работы.- М.: ИД Академия Жуковского, 2018.-40 с.
3. Ицкович А.А. Файнбург И.А. Показатели эффективности процессов поддержания летной годности воздушных судов// Научный вестник МГТУГА № 178, серия Эксплуатация воздушного транспорта и ремонт АТ. – М.: МГТУ ГА, 2012.
4. Метод структурных схем и оценка безотказности системы: метод. указания/ сост. С. В. Мрыкин, М. И. Вильчек. — Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. — 27 с.
5. Анализ надёжности системы самолёта на этапе проектирования: метод. указания/ сост. К. А. Нападов. — Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. — 17 с.
6. Мрыкин, С. В. Последствия функциональных отказов самолётных систем [Текст]: учеб. пособие. — Самара, 2009. — 49 с.