

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РФ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

Кафедра технической эксплуатации ЛА и АД

А. А. Ицкович

**ПОСОБИЕ
по выполнению лабораторных работ
по дисциплине
«УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ
ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ»**

**для студентов
специальности 130300
направления 552000
всех форм обучения**

Москва – 2003

ББК 052 – 082

И96

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Смирнов Н.Н.

Ицкович А.А.

И96 Пособие по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Управление процессами технической эксплуатации летательных аппаратов»: М.: МГТУ ГА, 2003. - с.

Данное пособие издается в соответствии с учебным планом для студентов специальности 130300 направления 552000 всех форм обучения .

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры 27. 05.03г. и методического совета 27.05.03г.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Целью проведения лабораторных работ является овладение научными методами анализа, систематизация и обобщение теоретических знаний, приобретенных при изучении материала по дисциплине «Управление процессами технической эксплуатации летательных аппаратов», получение навыков и умений применять теоретические знания к решению практических задач технической эксплуатации летательных аппаратов.

1.2. Лабораторные работы включают решение задач управления процессами технической эксплуатации изделий функциональных систем летательных аппаратов (ЛА) при разных стратегиях технического обслуживания и ремонта.

1.3. Пособие по каждой лабораторной работе содержит название темы и цель работы, характеристики объекта, необходимые теоретические сведения по теме, методические указания по выполнению работы. По каждой лабораторной работе предусмотрены варианты исходных данных. Кроме того преподаватель может выдать студентам дополнительные варианты.

1.4. По результатам выполнения каждой лабораторной работы студенты составляют отчет. Каждый отчет должен содержать тему и цель работы, исходные данные выполненного варианта, необходимые расчетные зависимости, результаты расчета в виде таблиц и графиков, выводы. Отчет подписывается студентом.

2. Лабораторная работа №1

Тема: Управление процессами технической эксплуатации изделий ЛА.

Цель: Практическое освоение методов управления процессами технической эксплуатации изделий ЛА при разных стратегиях их диагностирования и замены.

2.1. Объект лабораторной работы.

Объектом лабораторной работы является изделие ЛА, техническое состояние которого определяется параметрами z_i , $i = \overline{1, K}$, изменения которых во времени представляет собой монотонную случайную функцию z_i , $i = \overline{1, K}$ времени t (рис. 2.1). Установлены предельно допустимые значения параметров z_i^{**} , $i = \overline{1, K}$, пересечение которых реализациями случайной функции означает отказ. С учетом предъявленных требований по надежности могут быть определены минимальные предотказовые значения параметров z_i^* , $i = \overline{1, K}$, пересечение которых реализациями случайной функции означают

повреждение. Интервал $\Delta z = z^{**} - z^*$ образует упреждающий допуск. Область $\overline{0, z_i^*}$ назовем исправным состоянием (состояние 1), область $\overline{z_i^*, z_i^{**}}$ - состоянием профилактических замен (состояние 2), область $\overline{z_i^*, \infty}$ - неработоспособным состоянием (состояние 3).

В качестве объекта выбран аксиально-поршневой насос регулируемой подачи гидравлической системы самолета, для оценки технического состояния которого определяются значения параметров:

объемный КРД - z_2 (блок подачи);

максимальное давление - z_p (регулятор подачи);

суммарный осевой люфт - z_θ (шарнирные соединения поршневых пар);

параметр вибрации - z_k (подшипники);

параметр внешней герметичности - z_s (корпус).

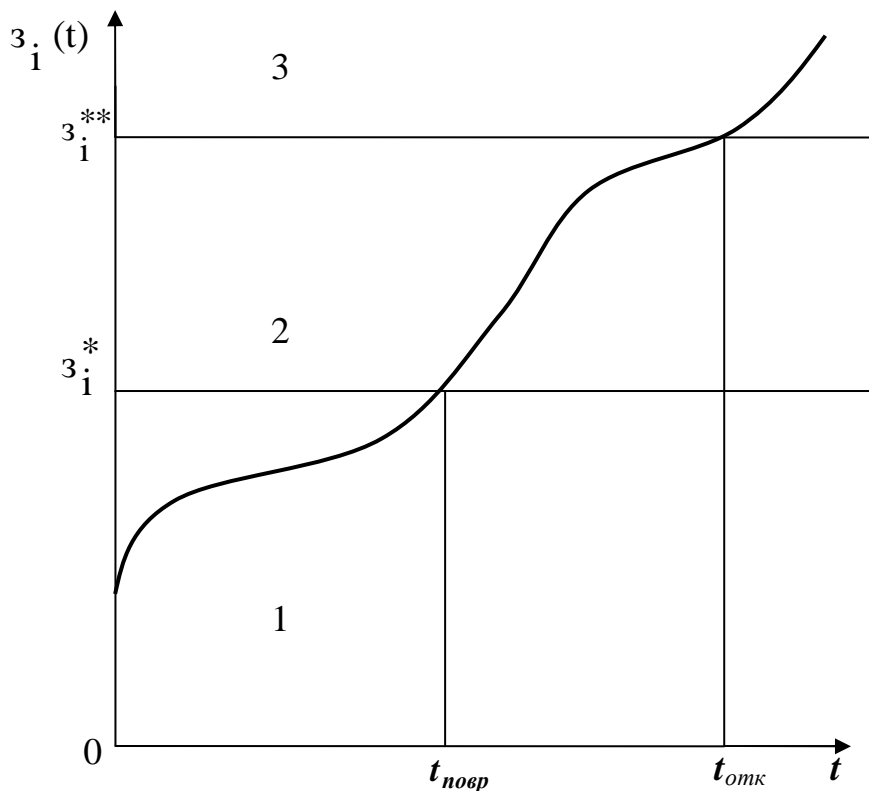


Рис. 2.1 Схема процесса изменения технического состояния изделия

2.2. Техническое задание

Лабораторная работа состоит из решения следующих задач:

- 1) формирование моделей диагностирования и замены изделий ЛА;
- 2) определение характеристик модели процесса технической эксплуатации изделий ЛА;

3) определение показателей эффективности процесса технической эксплуатации изделий ЛА.

2.3. Необходимые теоретические сведения.

Летательный аппарат как объект технического обслуживания и ремонта может быть представлен совокупностью изделий, заменяемых в процессе технической эксплуатации. Съемные изделия, относящиеся к классу восстанавливаемых или ремонтируемых, образуют свой процесс технической эксплуатации, который включает следующие состояния:

I_i , $i = \overline{1}$ - использование изделия на ЛА в исправном состоянии;

H_j , $j = \overline{1, m}$ - ожидание ремонта в неработоспособном состоянии;

Π_l , $l = \overline{1, r}$ - диагностические проверки;

Z_q , $q = \overline{1, m}$ - профилактические замены;

B_k , ($k = 1$) - восстановление (ремонт);

C_s , ($s = 1$) - хранение на складе в исправном состоянии.

Классификация моделей диагностирования и замены элементов и изделий выполнена по следующим признакам (табл. 2.1.).

По признаку стратегии замены элементов и изделий:

- 1) замена по ресурсу,
- 2) замена при отказе,
- 3) профилактическая замена при непрерывном контроле,
- 4) профилактическая замена при дискретном контроле.

По признаку вида элементов (изделий):

- а) неремонтируемые элементы,
- б) ремонтируемые элементы,
- в) ремонтируемые изделия.

Для формального описания процесса технической эксплуатации изделий используется математический аппарат полумарковских процессов.

Совокупность матрицы вероятностей переходов $P = \|P_{ij}\|$ и вектора абсолютных частот $p = (p_1, p_2, \dots, p_N)$ попадания в i -е состояние $i = \overline{1, N}$ определяют процесс переходов, а совокупность функций распределения времени пребывания в состояниях $F_i(t)$, $i = \overline{1, N}$ определяет процесс пребывания изделия в i -ом состоянии.

Вероятности переходов определены по статистическим данным о числе попаданий n_i изделия в i -е состояние и числе переходов n_{ik} из i -го в k -е состояние

$$P_{ik} = \frac{n_{ik}}{n_i}. \quad (2.1)$$

Таблица 2.1.

Схемы моделей диагностирования и замены элементов и изделий.

Стратегии замены	Модели "М" замены неремонтируемых "а" элементов	Модели "М" замены ремонтируемых "б" элементов	Модели "М" замены ремонтируемых "в" изделий
Замены по ресурсу M_1	<p>$\eta(t)$</p> <p>$\eta_{пр}$</p> <p>T_p t</p> <p>M_{1a}</p>	<p>$M_{1б}$</p>	<p>$M_{1в}$</p>
Замены при отказе M_2	<p>$\eta(t)$</p> <p>$\eta_{пр}$</p> <p>t</p> <p>M_{2a}</p>	<p>$M_{2б}$</p>	<p>$M_{2в}$</p>
Профилактические замены при непрерывном контроле M_3	<p>$\eta(t)$</p> <p>$\eta_{пр}$</p> <p>$\eta_{доп}$</p> <p>t</p> <p>M_{3a}</p>	<p>$M_{3б}$</p>	<p>$M_{3в}$</p>
Профилактические замены при дискретном контроле M_4	<p>$\eta(t)$</p> <p>$\eta_{пр}$</p> <p>$\eta_{доп}$</p> <p>T_1 T_2 T_3 t</p> <p>M_{4a}</p>	<p>$M_{4б}$</p>	<p>$M_{4в}$</p>

Вероятности попадания изделия в i -е состояние $p_i(t)$ могут быть определены из систем дифференциальных уравнений Колмогорова, для составления которых имеется удобное мнемоническое правило:

1) производная $dp_i(t)/dt$ вероятности пребывания системы в i -ом состоянии равна алгебраической сумме, число слагаемых которой равно числу ребер на графе состояний и переходов, соединяющих это состояние с другими состояниями;

2) если ребро направлено в i -е состояние, то слагаемое в сумме берется со знаком «+», если направлено из i -го состояния, то со знаком «-»;

3) каждое слагаемое равно произведению вероятности того состояния, из которого направлено ребро на вероятность перехода по данному направлению;

4) число отрицательных слагаемых равно числу ребер, направленных из i -го состояния, число положительных – числу ребер направленных в i -е состояние.

Пользуясь этим правилом, составим систему дифференциальных уравнений вида:

$$- \sum_{j=1}^N P_{ij} \pi_j(t) + \sum_{j=1}^N P_{ji} \pi_j(t) = \frac{dp_i(t)}{dt}. \quad (2.2)$$

Для эргодического процесса, учитывая что

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dp_i(t)}{dt} = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} p_i(t) = p_i$$

система уравнений (2.2) превращается в систему алгебраических уравнений вида:

$$- \sum_{j=1}^N P_{ij} \pi_j(t) + \sum_{i=1}^N P_{ji} \pi_j(t) = 0. \quad (2.3)$$

Такие уравнения составляются для каждого из состояний и добавляется уравнение нормировки

$$\sum_{i=1}^N \pi_i = 1. \quad (2.4)$$

Одно из уравнений (2.3) может быть исключено.

На основе заданных значений вероятностей отказов P_{ij} и средних значений времени пребывания в j -ом состоянии m_j , а также полученных значений вероятностей пребывания в j -ом состоянии p_j определяются показатели эффективности процесса технической эксплуатации изделий ЛА:

коэффициент в j -ом состоянии

$$K_j = \frac{p_j m_j}{\sum_{k=1}^N p_k m_k} \quad (2.5)$$

коэффициент использования

$$K_{И} = \frac{p_i m_i H_c}{\sum_{k=1}^N p_k m_k 24}, i \in И \quad (2.6)$$

коэффициент удельных простоев

$$K_{П} = \frac{l}{p_i m_i H_c}, l \in Н, П, З, В, С, l \in И, \quad (2.7)$$

где H_c - суточный налет, ч/сутки.

Для выбора управляющих воздействий по повышению эффективности процесса технической эксплуатации изделий ЛА необходимо определить доминирующие состояния, ранжируя по убыванию значения величин

$$p_l m_l, l \in Н, П, З, В, С. \quad (2.8)$$

2.4. Методические указания по выполнению лабораторной работы.

2.4.1. Вопросы, рекомендуемые к рассмотрению.

1. Какие состояния включает модель процесса технической эксплуатации изделий ЛА?

2. Какие стратегии замены изделий ЛА используются при управлении процессами технической эксплуатации ЛА?

3. По каким признакам выполнена классификация моделей замены и диагностирования изделий ЛА?

4. Какая математическая модель используется для описания процесса технической эксплуатации изделий ЛА?

5. Как составить систему дифференциальных уравнений Колмогорова?

6. Какие показатели эффективности процесса технической эксплуатации изделий ЛА определяются при управлении?

2.4.2. Получение исходных данных.

Варианты задания формируются в соответствии с данными табл. 2.3, 2.4

Выбор варианта задания студентами производится согласно шифру зачетной книжки по сумме трех последних цифр. Например, для шифра М73496, вариант №19 (4+9+6).

2.4.3. Порядок решения задач.

Задача №1. Формирование моделей диагностирования и замены изделий ЛА.

Выполнить анализ аксиально-поршневого насоса гидравлической системы ЛА как объекта технической эксплуатации и обосновать выбор параметров, определяющих его техническое состояние.

На основе анализа классификации моделей диагностирования и замены изделий ЛА (табл. 2.1), исходных данных (табл. 2.3, 2.4) обосновать выбор вида модели и сформировать граф состояний и переходов процесса технической эксплуатации изделий ЛА.

Задача №2. Определение характеристик модели процесса технической эксплуатации изделий ЛА.

Для графа состояний и переходов процесса технической эксплуатации изделий ЛА, сформированного в задаче №1 в соответствии с мнемоническим правилом, приведенным в пункте 2.3 составить систему алгебраических уравнений вида (2.3) и уравнение нормировки (2.4). Решить систему (2.4) относительно $p_i, i = \overline{1, N}$.

Таблица 2.3

Вероятности переходов P_{ij}

Вар.	$P_{ин_1}$	$P_{ин_2}$	$P_{ин_3}$	$P_{ин_4}$	$P_{ин_5}$	$P_{ип}$	$P_{пз_1}$	$P_{пз_2}$	$P_{пз_3}$	$P_{пз_4}$	$P_{пз_5}$	$P_{пи}$
1	0,010	0,015	0,005	0,026	0,021		0,025	0,055	0,035	0,045	0,015	
2	0,024	0,005	0,025	0,013	0,036		0,040	0,020	0,003	0,030	0,050	
3	0,020	0,055	0,032	0,045	0,015		0,030	0,040	0,010	0,056	0,023	
4	0,045	0,017	0,025	0,032	0,053		0,042	0,025	0,056	0,072	0,065	
5	0,052	0,023	0,040	0,018	0,033		0,081	0,038	0,062	0,044	0,055	
6	0,075	0,018	0,050	0,023	0,025		0,012	0,027	0,095	0,0110	0,035	
7	0,015	0,035	0,012	0,046	0,055		0,023	0,042	0,035	0,0120	0,012	
8	0,025	0,016	0,042	0,054	0,032		0,035	0,024	0,052	0,092	0,045	
9	0,032	0,019	0,053	0,027	0,065		0,070	0,015	0,032	0,025	0,062	
10	0,020	0,042	0,035	0,027	0,072		0,085	0,020	0,015	0,053	0,042	
11	0,045	0,023	0,035	0,018	0,055		0,018	0,035	0,022	0,037	0,065	
12	0,022	0,050	0,030	0,012	0,018		0,012	0,035	0,018	0,042	0,052	
13	0,035	0,027	0,052	0,090	0,042		0,023	0,018	0,042	0,035	0,060	
14	0,072	0,018	0,032	0,025	0,062		0,035	0,015	0,055	0,027	0,035	
15	0,045	0,010	0,025	0,037	0,055		0,024	0,065	0,015	0,013	0,036	
16	0,032	0,045	0,076	0,054	0,025		0,022	0,054	0,034	0,042	0,019	
17	0,045	0,025	0,052	0,071	0,065		0,042	0,018	0,023	0,034	0,055	
18	0,082	0,037	0,060	0,042	0,057		0,055	0,025	0,042	0,015	0,030	
19	0,036	0,022	0,050	0,085	0,045		0,028	0,018	0,040	0,052	0,034	
20	0,085	0,025	0,016	0,055	0,043		0,025	0,041	0,037	0,028	0,070	
21	0,024	0,016	0,045	0,037	0,056		0,038	0,028	0,050	0,089	0,045	
22	0,023	0,055	0,036	0,045	0,023		0,030	0,048	0,072	0,055	0,028	
23	0,019	0,037	0,025	0,039	0,068		0,046	0,025	0,032	0,021	0,052	
24	0,025	0,041	0,038	0,085	0,018		0,018	0,036	0,015	0,048	0,057	
25	0,040	0,028	0,052	0,070	0,067		0,048	0,018	0,028	0,035	0,056	
26	0,035	0,048	0,015	0,052	0,025		0,025	0,052	0,035	0,042	0,019	
27	0,087	0,025	0,018	0,052	0,045		0,025	0,045	0,038	0,029	0,075	
28	0,020	0,052	0,032	0,045	0,018		0,035	0,040	0,072	0,050	0,025	

$$P_{H,B} = P_{3,B} = P_{BC} = P_{CN} = 1$$

Таблица 2.4

Среднее время пребывания в i -ом состоянии m_i , $i = \overline{1, N}$
и суточный налет N_c

Исходные величины	Состояние	Варианты													
		1,2	3,4	5,6	7,8	9,10	11,12	13,14	15,16	17,18	19,20	21,22	23,24	25,26	27,28
m_i , $i = \overline{1, N}$, сутки	$I_j, j = \overline{1}$	210	150	180	120	200	140	150	190	170	160	130	150	170	190
	$H_j, j = \overline{1,5}$	86	60	50	45	75	40	70	80	55	65	50	65	55	90
	$\Pi_1, l = \overline{1}$	4	7	5	6	5	4	5	6	7	5	4	6	5	4
	$З_q, q = \overline{1,5}$	65	40	35	30	55	50	60	45	40	65	35	50	60	45
	$B_K, K = \overline{1}$	169	110	98	80	120	90	125	150	90	115	85	80	110	100
	$C_s, s = \overline{1}$	165	120	102	100	80	130	140	160	110	85	60	90	70	90
N_c , ч/сутки		4	6	5	7	6	4	5	4	6	5	4	6	5	4

Задача №3. Определение показателей эффективности процесса технической эксплуатации изделий ЛА.

Определение по формуле (2.5) коэффициента K_j , пребывания изделия в j -ом состоянии, $j = \overline{1, N}$ и представить в форме табл. 2.5.

Таблица 2.5

Оценка коэффициента K_j , $j = \overline{1, N}$ и определение доминирующих состояний

Состояние	p_j	m_j	$p_j m_j$	K_j
			$\sum_{j=1}^N p_j m_j$	

Определение коэффициента использования K_{II} по формуле (2.6) и коэффициента удельных простоев по формуле (2.7). Определение доминирующих состояний по величине $p_j m_j$ (табл. 2.5) и формирование управляющих воздействий по повышению эффективности процесса технической эксплуатации изделий ЛА.

3. Лабораторная работа № 2

Тема: Управление процессами технической эксплуатации изделий ЛА, заменяемых по состоянию.

Цель: Использование моделей экранов и замены изделий, подверженных износу и старению, для управления процессами технической эксплуатации.

3.1. В качестве объекта выбран аксиально-поршневой насос регулируемой подачи гидравлической системы самолета (см.п.2.1). Для оценки технического состояния которого определяются в данной лабораторной работе значение параметров:

объемный КПД - η_v (блок подачи);

максимальное давление - η_p (регулятор подачи);

суммарный осевой люфт - η_δ (шарнирные соединения).

3.2. Техническое задание

Лабораторная работа состоит из решения следующих задач:

1) формирование модели процесса технической эксплуатации изделий, заменяющихся по состоянию;

2) определение связи периодичности проверок с упреждающими допусками на контролируемый параметр;

3) определение характеристик процесса технической эксплуатации изделий, заменяемых по состоянию;

4) определение показателей эффективности процессов технической эксплуатации изделий, заменяемых по состоянию.

3.3. Необходимые теоретические сведения

Для изделия, техническое состояние которого определяется значениями контролируемых параметров $\eta_i(t), i = \overline{1, n}$, представляющих собой монотонную случайную функцию времени t и заданы предельно допустимые значения параметров $\eta_i^{**}, i = \overline{1, n}$, доказана теорема, устанавливающая связь периодичности проверок $\tau = T_2 - T_1$ и упреждающего допуска на контролируемый параметр $\Delta\eta_i = \eta_i^{**} - \eta^*$, следующего содержания: для монотонного случайного процесса $\eta(t)$ с заданными T_1 (момент первой проверки) и η^{**} очередной срок диагностики T_2 и минимальное предотказовое значение параметра η^* удовлетворяют следующему уравнению (рис.3.1):

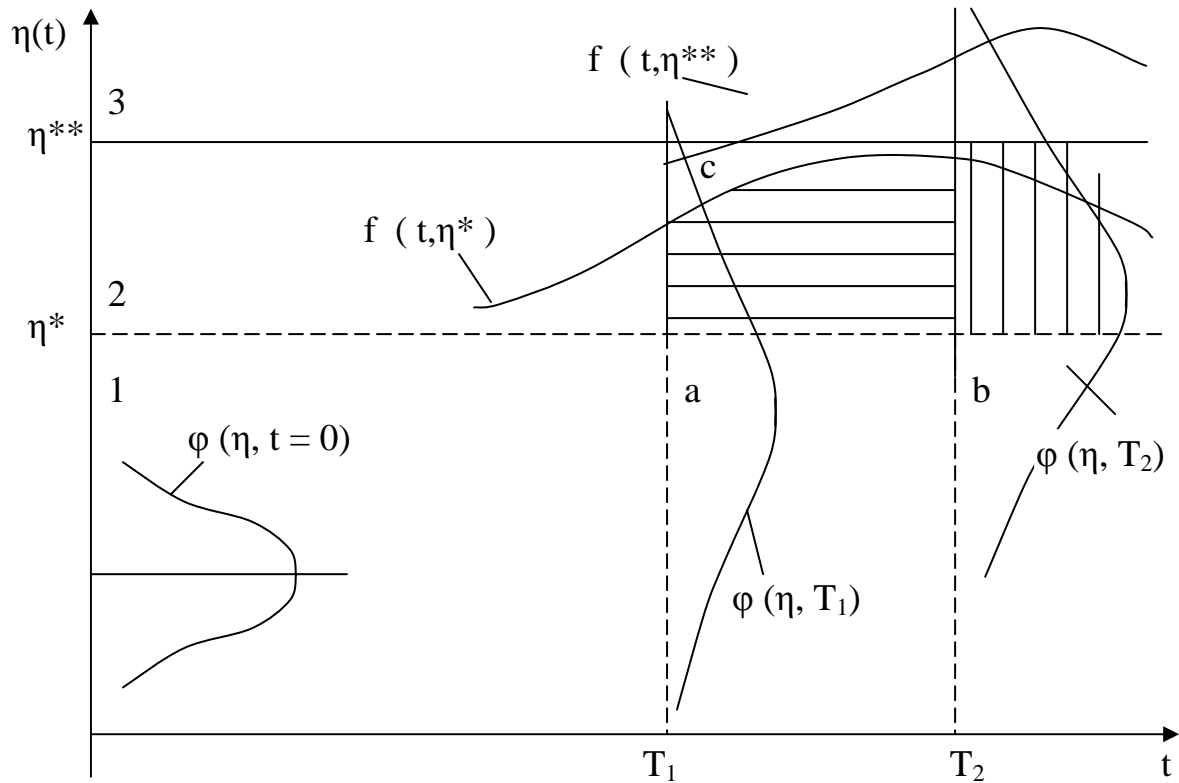


Рис.3.1. Связь периодических проверок $\tau = T_2 - T_1$ с упреждающим допуском на диагностический параметр $\Delta\eta = \eta^{**} - \eta^*$ (модель экранов).

$$\int_{T_1}^{T_2} f(t, \eta^*) dt = \int_{\eta^*}^{\eta^{**}} \varphi(\eta, T_2) d\eta, \quad (3.1)$$

где $f(t, \eta^*)$ - плотность распределения времени (наработки) достижения параметром минимального предотказового значения параметра η^* ,

$\varphi(\eta, T_2)$ - плотность распределения параметра η в момент T_2

Момент первой проверки T_1 определим из условия заданного уровня надежности $q_{дон} = 1 - P_{зад}$

$$P\{\eta^{**} \leq \eta(t) \leq \infty, T_1\} = \int_{\eta^{**}}^{\infty} \varphi(\eta, T_1) d\eta \leq q_{дон} \quad (3.2)$$

Пусть для нормального распределения $\varphi(\eta, t_i)$ моментные функции : математическое ожидание $m_\eta(t)$ и среднее квадратичное отклонение $\sigma_\eta(t)$ аппроксимированы линейной зависимостью

$$\left. \begin{aligned} m_{\eta}(t) &= m_a + m_b t \\ \sigma_{\eta}(t) &= \sigma_a + \sigma_b t \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Для нормального распределения $\varphi(\eta, t_i)$ на основании выражений (3.1-3.3) получим:

$$\eta^* = \frac{\eta^{**}(\sigma_a + \sigma_b T_1) + (m_a \sigma_b - m_b \sigma_a) \tau}{\sigma_a + \sigma_b T_1 + \sigma_b \tau}, \quad (3.4)$$

$$T_1 = \frac{\eta^{**} - m_a - U_{1-q_{дон}} \sigma_a}{m_b + U_{1-q_{дон}} \sigma_b}, \quad (3.5)$$

где $U_{1-q_{дон}}$ - квантиль нормального распределения, отвечающий вероятности $P_{зад} = 1 - q_{дон}$

Поясним физический смысл теоремы (3.1) с использованием представлений о горизонтальных η^*, η^{**} и вертикальных T_1, T_2 экранах. Будем называть отрезок $\Delta\eta = \eta^{**} - \eta^*$, означающий упреждающий допуск, вертикальным поглощающим экраном, а отрезок $\Delta T = T_{i+1} - T_i$ - горизонтальным экраном, который может быть как поглощающим так и прозрачным. При периодических проверках (см.рис.3.1) горизонтальный экран (ab) становится прозрачным и траектории случайного процесса достигают вертикального поглощающего экрана (bc).

Выполнение условий теоремы (3.1) обеспечивает такое расположение экранов, при котором все траектории процесса, прошедшие через горизонтальный экран (ab) попадают на вертикальный (bc). Математическую модель (3.1) назовем моделью экранов.

Для управления процессами технической эксплуатации изделий ЛА, заменяемых по состоянию и подверженных износу и старению, используется полумарковская модель, включающая следующие состояния (рис. 3.2):

$I_i, i = \overline{1, r-1}$ - использование изделия на ЛА в исправном состоянии;

$H_j (j = \overline{1, m})$ - ожидание ремонта в наработанном состоянии;

$П_l, L = \overline{1, r}$ - диагностические проверки;

$З_q (q = \overline{1, m})$ - профилактические замены;

$В_k (k = 1)$ - восстановление (ремонт);

$С_s (s = 1)$ - хранение на складе в исправном состоянии.

Для изделий, подверженных износу и старению вероятность замены зависит от наработки t_i . Для фиксированных значений периодичности τ_i и номера проверки r вероятность замены будет постоянной. Это свойство наблюдаемого случайного процесса, вытекающее из модели экранов (см.рис.3.1), можно использовать при построении модели процесса технической

эксплуатации с заменой изделий по состоянию с дискретным контролем параметров.

Для сохранения марковского свойства процесса в модели М4в (см.табл. 2.1) введены дополнительные исправные состояния $I_i, i = \overline{0, r-1}$ и соответствующие им состояния проверок $\Pi_l, l = \overline{1, r}$, различаемые по номеру межпроверочного периода при фиксированной периодичности проверок τ_i .

При принятых предложениях о полном восстановлении работоспособности изделий при ремонте, а также о замене на новые изделия, в случае необходимости, процесс будет регенерирующим; точками регенерации являются моменты возвращения процесса в состояние I_0 .

Граф состояний и переходов процесса технической эксплуатации изделий, подверженных износу и старению, представлен на рис.3.2. Вероятности переходов $I_i \rightarrow H_j, I_i \rightarrow \Pi_{i+1}, \Pi_{i+1} \rightarrow 3_q, \Pi_{i+1} \rightarrow I_{i+1}$ определяются моделью экранов (см.рис.3.1).

$$P_{I_i H_j} = 1 - P(\overline{A}) , \quad (3.6)$$

$$P_{I_i \Pi_{i+1}} = P(\overline{A}) , \quad (3.7)$$

$$P_{\Pi_{i+1} 3_q} = \frac{P(\overline{A}) - P(\overline{B})}{P(\overline{A})} , \quad (3.8)$$

$$P_{\Pi_{i+1} I_{i+1}} = 1 - P_{\Pi_{i+1} 3_q} , \quad (3.9)$$

где \overline{A} - событие "изделие не было заменено вследствие отказа до момента t_i ",

\overline{B} - событие "изделие не было заменено профилактически до момента t_i ".

Количество проверок определяется по формуле

$$r = \frac{T_r - T_1}{\tau} - 1 , \quad (3.10)$$

где T_r - момент последней (r-й) проверки.

При принятии предложениях о нормальном распределении $\varphi(\eta, t_i)$ параметров, линейных зависимостях моментных функций $m_\eta(t), \sigma_\eta(t)$ (3.3) и полном восстановлении работоспособности изделия на основе выражений (3.1-3.3) определим вероятности событий $P(\overline{A}), P(\overline{B})$, моменты первой T_1 и

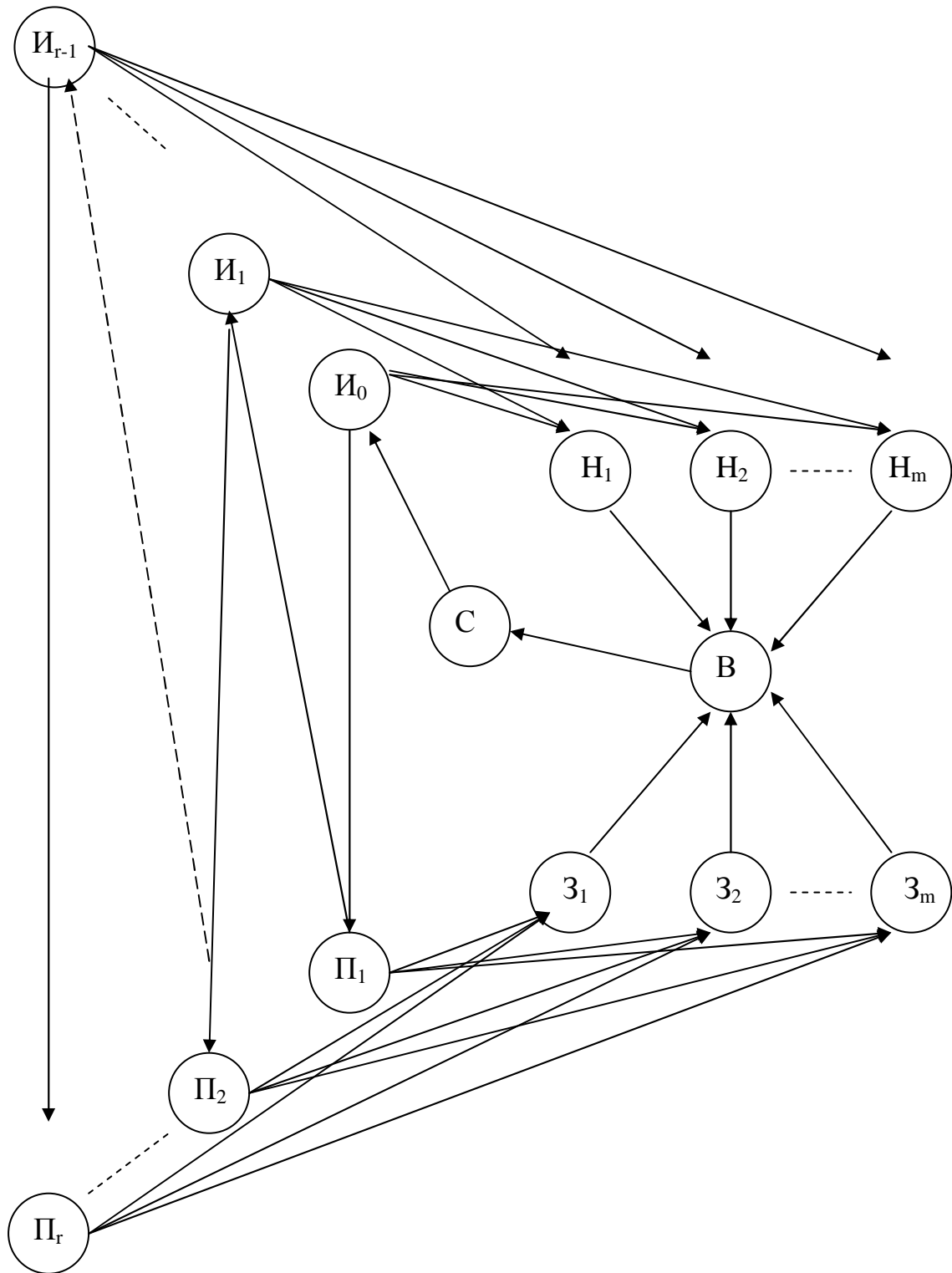


Рис.3.2. Схема модели замены ремонтируемых изделий, подверженных износу и старению.

последней T_r проверок, минимальное предотказовое значение параметра η^* для двух возможных случаев изменения диагностических параметров $\eta(t)$ по наработке:

1) монотонно возрастающей зависимости диагностического параметра от времени $\eta(t)$ (верхнее расположение η^{**} и η^*), что соответствует, например, изменению суммарного осевого люфта $\delta(t)$ в поршневых парах аксиально-поршневого гидравлического насоса;

2) монотонно убывающей зависимости диагностического параметра от времени $\eta(t)$ (нижнее расположение η^{**} и η^*), что соответствует, например, изменению объемного КПД $\gamma(t)$ и максимального давления $P(t)$ в линии нагнетания аксиально-гидравлического насоса.

При монотонно возрастающей зависимости диагностического параметра по времени $\eta(t)$ (верхнее расположение η^{**} и η^*):

$$T_1 = \frac{\eta^{**} - m_a - U_{1-q_{\text{дон}}} \sigma_a}{m_b + U_{1-q_{\text{дон}}} \sigma_b}, \quad (3.11)$$

$$\eta^* = \frac{\eta^{**} (\sigma_a + \sigma_b T_1) + (m_a \sigma_b - m_b \sigma_a) \tau}{\sigma_a + \sigma_b T_1 + \sigma_b \tau}, \quad (3.12)$$

$$T_r = \frac{\eta^* - m_a + U_{P_{3H}} \sigma_a}{m_b - U_{P_{3H}} \sigma_b}, \quad (3.13)$$

$$P_{\kappa}(\overline{A}) = F_0 \left(\frac{\eta^{**} - m_a - m_b T_{\kappa}}{\sigma_a + \sigma_b T_{\kappa}} \right), \kappa = \overline{1, r}, \quad (3.14)$$

$$P_{\kappa}(\overline{B}) = F_0 \left(\frac{\eta^* - m_a - m_b T_{\kappa}}{\sigma_a + \sigma_b T_{\kappa}} \right), \kappa = \overline{1, r}, \quad (3.15)$$

где $U_{1-q_{\text{дон}}}$ - квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности безотказной работы $1 - q_{\text{дон}} = P_{\text{зад}}$,

$U_{P_{3H}}$ - квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности P_{3H} того, что к моменту T_r все реализации $\eta(t)$ достигли уровня η^{**} .

При монотонно убывающей зависимости диагностического параметра по времени $\eta(t)$ (нижнее расположение η^{**} и η^*):

$$T_1 = \frac{m_a - \eta^{**} - U_{1-q_{don}} \sigma_a}{m_b + U_{1-q_{don}} \sigma_b} \quad (3.16)$$

$$\eta^* = \frac{\eta^{**} (\sigma_a + \sigma_b T_1) + (m_a \sigma_b + m_b \sigma_a) \tau}{\sigma_a + \sigma_b T_1 + \sigma_b \tau} \quad (3.17)$$

$$T_r = \frac{m_a - \eta^* + U_{P_{3M}} \sigma_a}{m_b + U_{P_{3H}} \sigma_b} \quad (3.18)$$

$$P_k(\overline{A}) = F_0 \left(\frac{m_a - m_b T_k - \eta^{**}}{\sigma_a + \sigma_b T_k} \right), \kappa = \overline{1, r} \quad (3.19)$$

$$P_k(\overline{B}) = F_0 \left(\frac{m_a - m_b T_k - \eta^*}{\sigma_a + \sigma_b T_k} \right), \kappa = \overline{1, r} \quad (3.20)$$

3.4 Методические указания по выполнению лабораторной работы

3.4.1. Вопросы, рекомендуемые к рассмотрению:

1. Что представляет собой упреждающий допуск на диагностический параметр изделия?
2. Изложите содержание теоремы, устанавливающей связь периодических проверок с упреждающим допуском на диагностический параметр?
3. Как определить момент первой проверки?
4. Какой зависимостью аппроксимируются моментные функции?
5. Что представляет собой монотонно возрастающая и монотонно убывающая зависимости диагностического параметра от времени?
6. Как обосновывается сохранение Марковского свойства процесса в модели эксплуатации ремонтируемых изделий, подверженных износу и старению?
7. При каких предположениях определяются характеристики модели эксплуатации ремонтируемых изделий, подверженных износу и старению?

3.4.2. Получение исходных данных.

Вариант задания формируется в соответствии с данными табл.3.1, 3.2.

Выбор варианта задания студентами производится согласно шифру зачетной книжки по сумме трех последних цифр.

3.4.3. Порядок решения задач

Задача № 1. Формирование модели процесса технической эксплуатации изделий, заменяемых по состоянию.

Выполнить анализ аксиально-поршневого насоса гидравлической системы самолета регулируемой подачи и обосновать выбор стратегии его диагностирования и замены.

На основе модели технической эксплуатации изделий, подверженных износу и старению и исходных данных построить граф состояний и переходов процесса технической эксплуатации аксиально-поршневого насоса для принятой стратегии диагностирования и замены.

Задача № 2. Определение связи периодичности проверок с упреждающим допуском на контролируемый параметр.

1. При монотонно возрастающей зависимости параметра от времени $\eta(t)$ (верхнее расположение η^{**} и η^*) расчет выполняется в следующем порядке:

- 1) определение момента первой проверки T_1 по формуле (3.11); квантиль нормального распределения по табл. П.1;
- 2) расчет минимального предотказового значения параметра η^* по формуле (3.12) при $\tau = 300ч.$;
- 3) определение момента последней (r -той) проверки T_r по формуле (3.13) квантиль нормального распределения по табл. п.1;
- 4) определение числа проверок r по формуле (3.10), при $r \leq 3$ принимаем полученные значения T_1, η^*, T_r и r , в противном случае подбираем τ , при котором $r \leq 3$ и выполняем повторный расчет η^*, T_r и r при фиксированном T_1 ;
- 5) расчет значений вероятностей событий $P_K(\bar{A}), P_K(\bar{B})$ для значений $T_K = T_1, T_2 = T_1 + \tau, T_3 = T_1 + 2\tau$, по формулам (3.14, 3.15), вероятность нормального распределения по табл. П.2.

2. При монотонно убывающей зависимости параметра от времени $\eta(t)$ (нижнее расположение η^{**} и η^*), расчет выполняется в следующем порядке:

- 1) определение момента первой проверки T_1 по формуле (3.16);
- 2) расчет минимального предотказового значения параметра η^* по формуле (3.17) при $\tau = 300ч.$;
- 3) определение момента последней (r -ой) проверки T_r по формуле (3.18);
- 4) определение числа проверок r по формуле (3.10), при $r \leq 3$ принимаем полученные значения T_1, η^*, T_r и r , в противном случае подбираем τ , при котором $r \leq 3$ и выполняем повторный расчет η^*, T_r и r при фиксированном T_1 ;
- 5) расчет значений вероятностей событий $P_K(\bar{A}), P_K(\bar{B})$ для значений $T_K = T_1, T_2 = T_1 + \tau, T_3 = T_1 + 2\tau, \dots$ по формулам (3.19, 3.20).

Задача № 3. Определение характеристик процесса технической эксплуатации изделий, заменяемых по состоянию.

Расчет выполняется в следующем порядке:

- 1) определение вероятностей переходов $P_{И_i Н}$, $P_{И_i П_{i+1}}$, $P_{П_i З}$, $P_{П_{i+1} И_{i+1}}$ модели процесса технической эксплуатации изделий, подверженных износу и старению (см.рис.3.2) по формулам (3.6-3.9). Вероятности безальтернативных переходов

$$P_{НВ} = P_{ЗВ} = P_{ВС} = P_{СИ_0} = 1;$$

- 2) для графа состояний и переходов процесса технической эксплуатации изделий, сформированного в задаче № 1 в соответствии с мнемоническим правилом, приведенным в п.2.3 составить систему алгебраических уравнений вида (2.3) и уравнение нормировки (2.4). Решаем систему (2.4,2.3) относительно $\pi_i, i = \overline{1, n}$

Таблица 3.1

Параметры изделий

Наименование	Обозначение	Ед.изм.	Вар.	m_a	m_b	σ_a	σ_b	η^{**}
Максимальное давление нагнетания	η_p	кг/см ²	1,2	219,3	0,0034	3,6	0,0006	205
			3,4	219	0,0032	3,5	0,0005	205
			5,6	220	0,0035	3,6	0,0006	205
			7,8	219,5	0,0033	3,4	0,0005	205
			9,10	220,2	0,0035	3,5	0,0006	205
Объемный КПД	η_v	б/р	11,12	0,915	0,000062	0,02	0,000012	0,750
			13,14	0,910	0,000061	0,022	0,000010	0,750
			15,16	0,920	0,000064	0,02	0,000012	0,750
			17,18	0,918	0,000063	0,025	0,000015	0,750
			19,20	0,914	0,000065	0,03	0,000010	0,750
Суммарный осевой люфт в шарнирных соединениях поршневых пар	η_δ	мк	21,22	51,73	0,0397	18,5	0,0012	150
			23,24	52	0,0398	18,0	0,0015	150
			25,26	51,8	0,0395	18,2	0,0013	150
			27,28	52,1	0,0390	19,0	0,0015	150
			29,30	52,3	0,04000	19,2	0,0016	150

Задача № 4. Определение показателей эффективности процессов технической эксплуатации изделий, заменяемых по состоянию.

Определение по формуле 2.5 значений коэффициента K_i пребывания изделия в i -том состоянии $i = \overline{1, n}$ и представление результатов в форме табл.2.5.

Определение коэффициента использования $K_{И}$ по формуле (2.6) и коэффициента простоя $K_{П}$ по формуле (2.7).

Определение доминирующих состояний по величине $\pi_i M_i$ (табл.2.5) и формирование управляющих воздействий по повышению эффективности процесса технической эксплуатации изделий ЛА.

Таблица 3.2

Среднее время пребывания в i -том состоянии $M_i, i = \overline{1, n}$ и суточный налет H_C

Варианты	Состояния							
	n_0	$M_i, i = \overline{1, r-1}$	$H_j, j = \overline{1, m}$	$\Pi_l, l = \overline{1, r}$	$З_q, q = \overline{1, m}$	$B_k, k = 1$	$C_s, s = 1$	H_C
1,2	127,9	21,5×к	86	0,041	0,104	196,6	65,6	6
3,4	130	21×к	80	0,05	0,15	200	60	5
5,6	135	23×к	75	0,07	0,18	180	55	4
7,8	137	23,5×к	70	0,08	0,2	170	50	6
9,10	140	24×к	65	0,09	0,25	160	45	5
11,12	130	22×к	75	0,07	0,18	170	55	4
13,14	135	24×к	70	0,08	0,18	190	60	6
15,16	150	25×к	80	0,05	0,15	170	50	5
17,18	140	22×к	60	0,1	0,2	150	55	4
19,20	150	25×к	50	0,12	0,15	140	45	6
21,22	120	20×к	45	0,2	0,08	120	40	5
23,24	140	21×к	55	0,05	0,15	110	50	4
25,26	125	25×к	40	0,08	0,12	100	60	6
27,28	115	0,2×к	70	0,1	0,2	150	45	5
29,30	155	25×к	50	0,06	0,16	120	50	4

Примечание: при $\tau=100, k=1$, при $\tau=200, k=2, \dots$

4. Лабораторная работа №3

Тема: Управление режимами технического обслуживания и ремонта изделий ЛА с учетом старения и частичного восстановления.

Цель: Практическое освоение методов управления режимами технического обслуживания и ремонта изделий ЛА.

4.1. Объект лабораторной работы:

Объектом лабораторной работы является ЛА, изделия которого по мере старения подвергаются частичному восстановлению. Пусть I_K , $0 \leq K \leq N$ состояние объекта в зависимости от числа восстановлений, а B – состояние частичного восстановления, в котором с вероятностью P_0 («качество восстановления») изделие заменяется новым (полностью восстанавливается), а с вероятностью $q_0 = 1 - P_0$ продолжает эксплуатироваться в прежнем состоянии (рис. 4.1а). Установлен заданный уровень безотказности: вероятности безотказной работы $P^* = 1 - q^*$, где q^* – допустимая вероятность отказа. Состояние U_K является смешанным состоянием, т.е. среднестатистический объект, находящийся в состоянии U_K с вероятностью P_{SK} , $0 \leq S \leq N$, $\sum_S P_{SK} = 1$ является объектом проработавшим время $s\varphi_0$ без восстановления, где φ_0 – периодичность технического обслуживания (ремонта) ЛА.

4.2. Техническое задание.

Лабораторная работа состоит из решения следующей задачи:

- 1) определение параметров закона распределения Вейбулла наработки изделия до отказа;
- 2) оценка параметров функции затрат на техническое обслуживание и ремонт ЛА;
- 3) определение оптимальной периодичности технического обслуживания и ремонта изделий ЛА;
- 4) управление режимами технического обслуживания и ремонта изделий ЛА.

4.3. Необходимые теоретические сведения.

Для изделия, полное восстановление (замена на новое) которого производится с вероятностью P_0 ($q_0 = 1 - P_0$ – вероятность продолжения эксплуатации в том же состоянии) при каждом техническом обслуживании (ремонте), выполняемом с периодичностью φ_0 , установлена заданная вероятность безотказной работы $P^* = 1 - q^*$, где q^* – допустимая вероятность отказа. Задача управления режимами технического обслуживания и ремонта ЛА заключается в определении периодичности φ_0 (и, возможно, «качества восстановления» P_0), обеспечивающих минимальные удельные затраты на техническое обслуживание и ремонт $C(\varphi_0, P_0)$ при заданном уровне надежности $P \geq 1 - q^*$. Блок-схема модели оптимизации режимов технического обслуживания и ремонта изделий с учетом старения и частичного восстановления приведена на рис. 4.1.

При решении задач приняты следующие предположения:

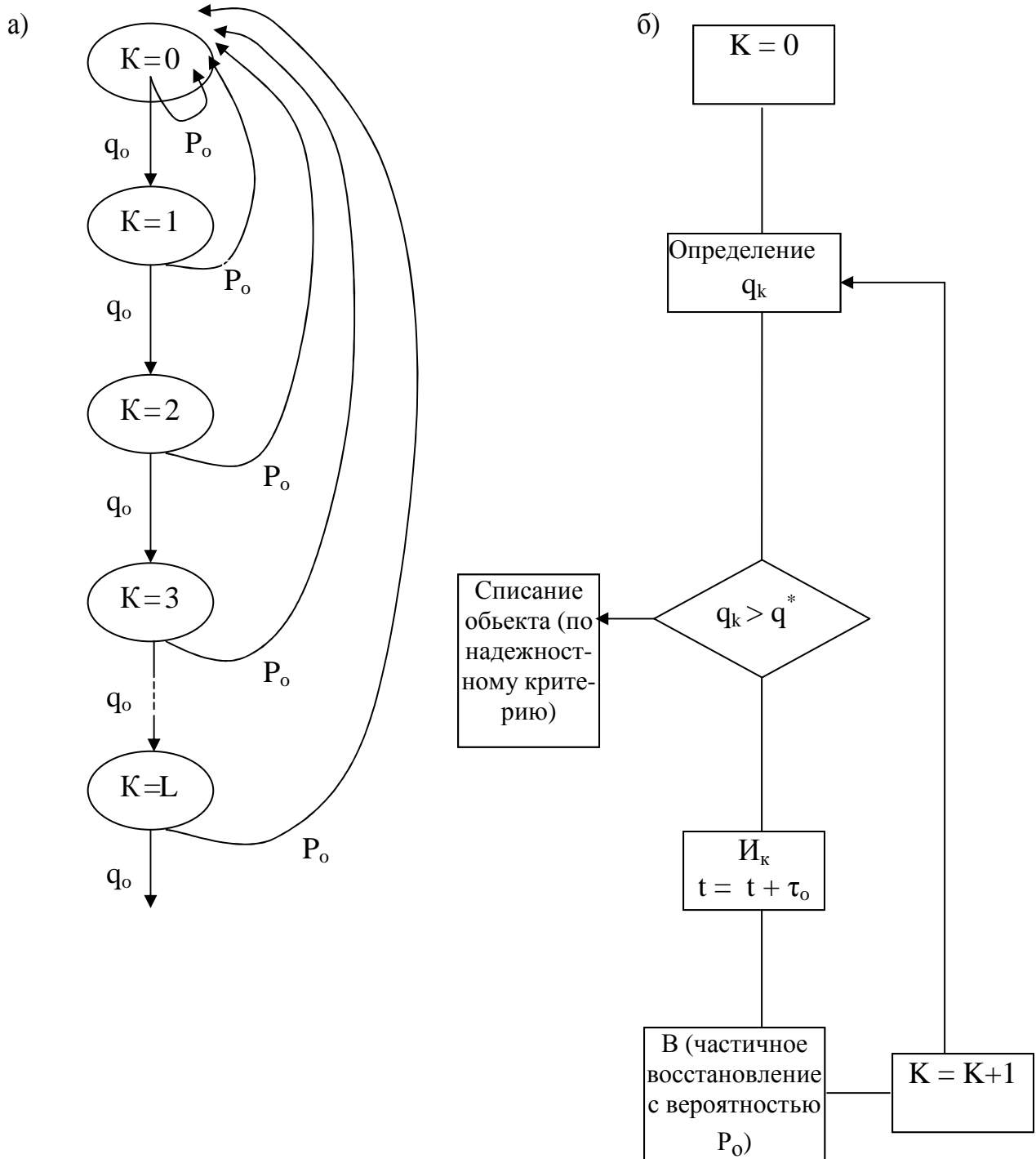


Рис. 4.1 Модель управления режимами технического обслуживания и ремонта изделий с учетом старения и частичного восстановления: а) – механизм формирования технического состояния изделий; б) – блок-схема модели процесса технической эксплуатации изделий.

1) наработка изделий до отказа имеет распределение Вейбулла с плотностью

$$f_0(t) = \lambda b t^{b-1} \cdot e^{-\lambda t^b},$$

где λ, b - параметры распределения Вейбулла;

в табл. П.3 $\lambda = \frac{1}{a}, b = b$.

Коэффициент вариации определяется по формуле:

$$V = \frac{y_t}{m_t},$$

где m_t и y_t - математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение наработки до отказа, соответственно.

2) функция затрат на техническое обслуживание и ремонт имеет вид

$$M_0(t) = A_1 + A_2 t + A_3 t^v, \quad v > 0,$$

где A_1 - разовые затраты

$A_2 t$ - затраты пропорциональные времени (наработке),

$A_3 t^v$ - затраты на восстановление.

Оценка параметров функции затрат выполняется по формулам

$$M_0(t) = A_1 + A_3 t^v, \quad (4.4)$$

$$\text{где } v = \frac{\sum_{i=1}^n (\ln M_{0i} \cdot \ln t_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln M_{0i} \cdot \sum_{i=1}^n \ln t_i}{\sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2},$$

(4.5)

$$A_3 = \exp \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln M_{0i} - v \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i \right), \quad (4.6)$$

$$A_1 = \begin{cases} M_{01} + \Delta M_{01}^{\hat{v}} & \text{при } A_3 < 0 \\ M_{01} - \Delta M_{01}^{\hat{v}} & \text{при } A_3 > 0, \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_{0i} & \text{при } A_3 = 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\Delta M_0^{\hat{v}} = t_f^{\hat{v}^*} \frac{\bar{S}(M_0)}{\sqrt{n}}, \quad \hat{v}^* = 0,99, \quad f = n - 1, \quad (4.8)$$

$$\bar{S}(M_0) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_{0i}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n M_{0i} \right)^2}{n-1}}, \quad (4.9)$$

где $t_f^{\bar{\sigma}^*}$ - коэффициент Стьюдента при уровне значимости $\bar{\sigma}^*$ и числе степеней свободы f для выборки объема n .

При заданных значениях P_0 , q^* , найденных выше параметрах распределения Вейбулла $\bar{\sigma}$, l и параметрах функции затрат A_1 , A_3 , ν оптимальная периодичность технического обслуживания и ремонта определяется следующим образом:

А. В предположении выполнения условия бесконечного времени жизни изделия вычисляем φ_0

$$\varphi_0 = \left| \frac{A_1}{A_3 \cdot \Gamma(\nu + 1) \cdot (\nu - 1)} \right|^{\frac{1}{\nu}} \cdot |\ln q_0|, \quad (4.10)$$

где $\Gamma(\nu + 1)$ - гамма-функция.

Б. Проверка условия бесконечного времени жизни изделия

$$\frac{q_0 |\ln q_0|}{\varphi_0} \int_0^{\infty} f_0(t) e^{-t |\ln q_0| / \varphi_0} dt \leq q^*. \quad (4.11)$$

Если $f_0(t)$ имеет распределение Вейбулла (4.1), то соотношение (4.11) можно заменить на

$$\frac{l \varphi_0^{\nu} \cdot P_0^2 \cdot \Gamma(\bar{\sigma} + 1)}{q_0 |\ln q_0|^{\bar{\sigma} + 1}} \leq q^*. \quad (4.12)$$

В. Если значение φ_0 из (4.10) удовлетворяет неравенствам (4.11), (4.12), то вычисленная по (4.10) периодичность технического обслуживания и ремонта является оптимальной.

В противном случае φ_0 определяется из уравнения

$$\frac{q_0 |\ln q_0|}{\varphi_0} \int_0^{\infty} f_0(t) e^{-t |\ln q_0| / \varphi_0} dt = q^* \quad (4.13)$$

или, в случае распределения Вейбулла, по формуле

$$\varphi_0 = \left(\frac{q_0 \cdot q^* |\ln q_0|^{\bar{\sigma} + 1}}{l \cdot P_0^2 \cdot \Gamma(\bar{\sigma} + 1)} \right)^{1/\bar{\sigma}} \quad (4.14)$$

Управление режимами технического обслуживания и ремонта можно производить, варьируя значением вероятности полного восстановления («качества восстановления») P_0 .

4.4. Методические указания по выполнению лабораторной работы.

4.4.1. Вопросы, рекомендуемые к рассмотрению.

1. Каким параметром определяется частичное восстановление (обновление) объекта?

2. Как задается уровень безотказности объекта?

3. Какой критерий принимается при оптимизации периодичности технического обслуживания объекта?

4. Какой закон распределения наработки до отказа предполагается в данной работе?

5. Как оцениваются параметры закона распределения наработки до отказа?

6. Какая функция затрат используется в данной работе?

7. Как определяются параметры функции затрат?

8. Как определяется оптимальная периодичность технического обслуживания и ремонта?

9. Варьируя каким параметром можно управлять режимами технического обслуживания и ремонта?

4.4.2. Получение исходных данных.

Варианты исходных данных формируются в соответствии с данными табл. 4.1.

Выбор варианта задания студентами производится согласно шифру зачетной книжки по сумме трех последних цифр.

4.4.3. Порядок решения задач.

Задача №1. Определение параметров закона распределения Вейбулла наработки изделия до отказа. Вычислить коэффициент вариации по формуле (4.2.).

По табл. П2 определить параметр $\delta = b$ и коэффициент K_b , по которому вычислить $\lambda = \frac{1}{a}$.

Задача №2. Оценка параметров функции затрат на техническое обслуживание и ремонт ЛА.

1) Вычислить параметр v по формуле (4.5). Расчеты рекомендуется выполнить с использованием табл. 4.2.

2) Определить A_3 по формуле (4.6).

3) По табл. П.3 определить коэффициент Стьюдента для $\delta^* = 0,99$, $f = n - 1$, приняв $n = 25$.

Определить DM_0^{δ} по формуле (4.8), приняв $\bar{S}(M_0) = \frac{M_0}{2}$.

4) вычислить A_1 по формуле (4.7) с учетом полученного значения параметра A_3 .

Задача №3. Определение оптимальной периодичности технического обслуживания и ремонта ЛА.

Расчеты выполнить в следующем порядке:

1) в предположении условия бесконечного времени жизни изделия определить ϕ_0 по формуле (4.10), значения гамма-функции определить по табл. П.4;

2) проверить условие бесконечного времени жизни по формуле (4.12);

3) если значение ϕ_0 из (4.10) удовлетворяет неравенству (4.12), то вычисленная по (4.10) периодичность технического обслуживания и ремонта ϕ_0 является оптимальной;

4) в противном случае ϕ_0 определяется по формуле (4.14).

Задача №4. Управление режимами технического обслуживания и ремонта изделий ЛА.

Варьируя значениями вероятности полного восстановления P_0 , определить значения периодичностей технического обслуживания и ремонта, повторив расчеты по формулам (4.10) или (4.14). Построить график $\phi_0(P_0)$ и выполнить анализ полученных результатов.

Таблица 4.1

Исходные данные

Вариант	t, ч	M_{0i} , чел-ч	P^*	P_0	m_t	y_t
1	2	3	4	5	6	7
1,2	300	85,0	0,95	0,30	1000	550
	900	177,3				
	1800	274,4				
3,4	300	91,5	0,90	0,25	2000	1100
	900	277,3				
	1800	360,2				
5,6	300	176,5	0,85	0,20	3000	1600
	900	454,9				
	1800	634,6				
7,8	300	112,5	0,80	0,15	3500	1900
	900	257,3				
	1800	421,2				
9,10	300	133,4	0,75	0,12	2800	1500
	900	302,2				
	1800	570,3				
11,12	300	142,2	0,95	0,18	2500	1400
	900	295,5				
	1800	570,2				
13,14	300	156,1	0,92	0,16	3200	1800
	900	342,5				
	1800	590,4				
15,16	300	84,7	0,80	0,15	4000	2100
	900	123,6				
	1800	198,2				

Продолжение табл. 4.1						
1	2	3	4	5	6	7
17,18	300 900 1800	39,1 71,2 176,0	0,75	0,10	5000	2600
19,20	300 900 1800	123,8 194,6374,8	0,70	0,05	6000	3200
21,22	300 900 1800	98,2 210,4 395,3	0,90	0,20	4600	2500
23,24	300 900 1800	135,2 250,1 480,5	0,95	0,15	3700	2000
25,26	300 900 1800	67,2 150,3 290,4	0,85	0,25	5200	3000
27,28	300 900 1800	98,3 210,2 450,5	0,98	0,18	4200	2400
29,30	300 900 1800	127,2 280,4 620,3	0,85	0,20	3800	2000

Таблица 4.2

Расчет параметра в

t_i	M_{0i}	$\ln t_i$	$\ln M_{0i}$	$\ln t_i \cdot \ln M_{0i}$	$(\ln t_i)^2$
		$\sum_{i=1}^n \ln t_i$	$\sum_{i=1}^n \ln M_{0i}$	$\sum_{i=1}^n \ln t_i \cdot \ln M_{0i}$	$\sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2$

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Значения $F_0(X)$

X		0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	5000	5040	5080	5120	5160	5199	5239	5279	5319
0,1	0	5398	5438	5478	5517	5557	5596	5636	5675	5714
0,2	0	5793	5832	5871	5910	5948	5987	6026	6064	6103
0,3	0	6179	6217	6255	6293	6331	6368	6406	6443	6480
0,4	0	6554	6591	6628	6664	6700	6736	6772	6808	6844
0,5	0	6915	6950	6985	7019	7054	7088	7123	7157	7190
0,6	0	7257	7291	7324	7357	7389	7422	7454	7486	7517
0,7	0	7580	7611	7642	7673	7704	7344	7764	7794	7823
0,8	0	7881	7910	7939	7967	7995	8023	8051	8078	8106
0,9	0	8159	8186	8212	8238	8264	8289	8315	8340	8365
1	0	8413	8438	8461	8485	8508	8531	8554	8577	8599
1,1	0	8643	8665	8686	8708	8729	8749	8770	8790	8810
1,2	0	8849	8869	8888	8907	8925	8944	8962	8980	8997
1,3	0,9	0320	0490	0658	0824	0988	1149	1308	1466	1621
1,4	0,9	1924	2073	2220	2364	2507	2647	2785	2922	3056
1,5	0,9	3319	3448	3574	3699	3822	3943	4062	4179	4295
1,6	0,9	4520	4630	4738	4845	4950	5053	5154	5254	5352
1,7	0,9	5543	5637	5728	5818	5907	5994	6080	6164	6246
1,8	0,9	6407	6485	6562	6637	6712	6784	6856	6926	6995
1,9	0,9	7128	7193	7257	7320	7381	7441	7500	7558	7615
2	0,9	7725	7778	7831	7882	7932	7982	8030	8077	8124
2,1	0,9	8214	8257	8300	8341	8382	8422	8461	8500	8537
2,2	0,9	8610	8645	8679	8713	8745	8778	8809	8840	8870
2,3	0,9	8928	8956	8983	9010	9036	9061	9086	9111	9134
2,4	0,99	1802	2024	2240	2451	2656	2857	3053	3244	3431
2,5	0,99	3790	3963	4132	4297	4457	4614	4766	4915	5060
2,6	0,99	5339	5473	5603	5731	5855	5975	6093	6207	6319
2,7	0,99	6533	6636	6736	6833	6928	7020	7110	7197	7282
2,8	0,99	7445	7523	7599	7673	7744	7814	7882	7948	8012
2,9	0,99	8134	8193	8250	8305	8359	8411	8462	8511	8559
3	0,99	8650	8694	8736	8777	8817	8856	8893	8930	8965

Таблица П.2

Коэффициенты для распределения Вейбулла

b	Kb	Cb	U
0,2	120	1900	15.83
0,3	8,86	46.9	5.29
0,4	3,32	10.4	3.14
0,5	2	4.47	2.24
0,6	1,50	2.61	1.74
0,7	1.27	1.86	1.46
0,8	1.13	1.43	1.26
0,9	1.05	1.17	1.11
1	1.00	1.00	1.00
1,1	0.965	0.878	0.910
1,2	0.941	0.787	0.837
1,3	0.924	0.716	0.775
1,4	0.911	0.659	0.723
1,5	0.903	0.612	0.678
1,6	0.897	0.574	0.640
1,7	0.892	0.540	0.605
1,8	0.889	0.512	0.575
1,9	0.887	0.485	0.547
2	0.886	0.463	0.523
2,1	0.886	0.441	0.489
2,2	0.886	0.425	0.480
2,3	0.886	0.409	0.461
2,4	0.887	0.394	0.444
2,5	0.887	0.380	0.428
3	0.893	0.326	0.365
3,5	0.900	0.285	0.316
4	0.906	0.255	0.281

Таблица П.3

Значения коэффициента Стьюдента t_{β}

$f = k$	β						
	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	0.995	0.999
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.09	31.60
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	12.92
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.595	8.610
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	6.869
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.959
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.500	4.029	5.408
8	1.397	1.860	2.306	2.897	3.355	3.833	5.041
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.781
10	1.372	1.813	2.228	2.764	3.169	3.581	4.587
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.437
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	4.318
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.373	4.221
14	1.345	1.761	2.145	2.625	2.977	3.326	4.141
15	1.341	1.753	2.131	2.603	2.947	3.286	4.073
16	1.337	1.746	2.120	2.584	2.921	3.252	4.015
17	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.222	3.965
18	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.922
19	1.328	1.729	2.093	2.540	2.861	3.174	3.883
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.850
22	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.119	3.792
24	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.091	3.745
26	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.067	3.707
28	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.047	3.674
30	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.030	3.646
40	1.303	1.684	2.021	2.423	2.705	2.971	3.551
50	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	2.936	3.496
60	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	2.915	3.460
80	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	2.887	3.416
100	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	2.871	3.391
150	1.287	1.655	1.976	2.352	2.609	2.849	3.357
200	1.286	1.653	1.972	2.345	2.601	2.839	3.340
300	1.284	1.650	1.968	2.339	2.592	2.828	3.323
500	1.283	1.648	1.965	2.334	2.586	2.82	3.310
∞	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	2.807	3.291

Значения гамма-функции

X	$\Gamma(x)$	X	$\Gamma(x)$	X	$\Gamma(x)$	X	$\Gamma(x)$
1,00	1,0000	1,25	0,9064	1,50	0,8862	1,75	0,9191
1.01	0.9943	1.26	0.9044	1.51	0.8866	1.76	0.9214
1.02	0.9888	1.27	0.9025	1.52	0.8870	1.77	0.9238
1.03	0.9835	1.28	0.9007	1.53	0.8876	1.78	0.9262
1,04	0,9784	1,29	0,8990	1,54	0,8882	1,79	0,9288
1,05	0,9735	1,30	0,8975	1,55	0,8889	1,80	0,9314
1.06	0.9687	1.31	0.8960	1.56	0.8896	1.81	0.9341
1.07	0.9642	1.32	0.8946	1.57	0.8905	1.82	0.9368
1.08	0.9597	1.33	0.8934	1.58	0.8914	1.83	0.9397
1,09	0,9555	1,34	0,8922	1,59	0,8924	1,84	0,9426
1,10	0,9514	1,35	0,8912	1,60	0,8935	1,85	0,9456
1, 1	0,9474	1,36	0,8902	1,61	0,8947	1,86	0,9487
1,12	0,9436	1,37	0,8893	1,62	0,8959	1,87	0,9518
1,13	0,9399	1,38	0,8885	1,63	0,8972	1,88	0,9551
1,14	0,9364	1,39	0,8879	1,64	0,8986	1,89	0,9584
1,15	0,9330	1,40	0,8873	1,65	0,9001	1,90	0,9618
1,16	0,9298	1,41	0,8868	1,66	0,9017	1,91	0,9652
1,17	0,9267	1,42	0,8864	1,67	0,9033	1,92	0,9688
1,18	0,9237	1,43	0,8860	1,68	0,9050	1,93	0,9724
1,19	0,9209	1,44	0,8858	1,69	0,9068	1,94	0,9761
1,20	0,9182	1,45	0,8857	1,70	0,9086	1,95	0,9799
1.21	0.9156	1.46	0.8856	1.71	0.9106	1.96	0.9837
1.22	0.9131	1.47	0.8856	1.72	0.9126	1.97	0.9877
1.23	0.9108	1.48	0.8857	1.73	0.9147	1.98	0.9917
1,24	0,9085	1,49	0,8859	1,74	0,9168	1,99	0,9958
0,5	1,7725	1,5	0,8862	2,5	1,3294	3,5	3,3233
0,5	$\sqrt{\pi}$	1,5	$1/2 \sqrt{\pi}$	2,5	$3/4 \sqrt{\pi}$	3,5	$15/8 \sqrt{\pi}$

ЛИТЕРАТУРА

1. Ицкович А.А. Управление процессами технической эксплуатации летательных аппаратов. Часть 2. Методология программного управления процессами технической эксплуатации летательных аппаратов: Учебное пособие. –М.: МГТУ ГА, 2002.

2. Ицкович А.А. Оптимизация программ технического обслуживания и ремонта машин. –М.: Знание, 1987.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения.....	3
2. Лабораторная работа №1. Тема: Управление процессами технической эксплуатации изделий ЛА.	3
3. Лабораторная работа № 2 Тема: Управление процессами технической эксплуатации изделий ЛА, заменяемых по состоянию.....	11
4. Лабораторная работа №3. Тема: Управление режимами технического обслуживания и ремонта изделий ЛА с учетом старения и частичного восстановления.	20
Приложения.....	28
Литература.....	323