

СТАУ: 6(У)  
П383

**САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА**

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ  
И РЕМОНТ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ  
ПО СОСТОЯНИЮ**

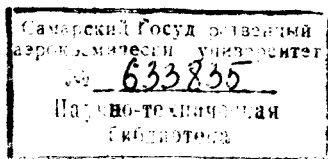
**САМАРА 1994**

[1996]

Государственный комитет Российской Федерации  
по высшему образованию  
Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С.П.Королева

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТ  
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ПО СОСТОЯНИЮ

Методические указания  
к индивидуальным занятиям



Самара 1994

Составитель И.М.Макаровский

УДК 629.7.658.58.004

Техническое обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию: Метод. указания к индивидуальным занятиям /Самар. аэрокосм. ун-т; Сост. И.М.Макаровский. Самара, 1994, 36 с.

Рассматриваются методы определения периодичности проверок и упреждающих допусков на диагностические параметры, оперативного контроля надежности, а также анализа эффективности процессов технической эксплуатации ЛА.

Указания предназначены для самостоятельного изучения теории вопроса и решения задач студентами специальности 13.03. Составлены на кафедре ЭЛАиД.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева

Рецензент Г.А.Резниченко

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛА

Цель занятия - приобретение и закрепление знаний студентами по теме курса, посвященной анализу процессов технической эксплуатации ЛА (ПТЭ), и, в частности, изучение метода анализа их эффективности.

### Содержание занятия

1. Изучение метода анализа эффективности ПТЭ.
2. Проведение анализа эффективности заданного ПТЭ.

### Метод анализа эффективности ПТЭ

Техническая эксплуатация (ТЭ) представляет собой совокупность состояний, связанных с использованием, техническим обслуживанием и ремонтом (ТО и Р), а также с подготовкой ЛА к вылетам. Последовательная во времени смена состояний ТЭ образует процесс технической эксплуатации (ПТЭ). Количество выделяемых состояний (обычно до 2Г), среднее время пребывания в них ЛА, а также частоты попадания ЛА в различные состояния характеризуют структуру ПТЭ (табл. Г). Она зависит от типа ЛА, характера летной работы, совершенства организации и технической оснащенности технологических процессов ТО и Р.

К ПТЭ предъявляются высокие требования по обеспечению безопасности и регулярности полетов, интенсивности и экономичности использования ЛА. По степени соответствия этим требованиям судят об эффективности процесса.

Следует отметить, что проблема обеспечения высокой эффективности ПТЭ носит комплексный характер. В силу этого при планировании мероприятий, направленных на его совершенствование, необходимо учи-

Таблица I

## Типовые состояния ЦТЗ в их границах

№ состояния	Цифры состояния	Наименование состояния	Границы состояния		Условные обозначения состояния на диспетчерском графике
			начало	окончание	
1	Р	В рейсе	<u>Исключения</u>		
			Вылет в базовом аэропорту	Посадка в базовом аэропорту	Зеленая штриховая линия (↑ - время вылета, ↓ - время посадки)
2	Б	Обеспечение рейса	Посадка	Сюмчанке ОТО (Ф-А)	Зеленая волнистая линия
3	М	Простой по метеословитам и запретами полетов	Время вылета до раскисания	Время вылета чешского вылета	Зеленая сплошная линия с пометкой "метео" или "запрет"
4	Г	В резерве	Посадка в резерв	Снятые резерва	Зеленая сплошная линия с пометкой "резерв"
5	А	В ожидании рейса	Готовность ЛА	Начало ОТО	Зеленая сплошная линия
6	У	Управление неуправляемой	Момент вылета (посадка)	Готовность ЛА	Синяя волнистая линия
7	Об	Ожидание ОТО	<u>Исключения</u>		
			Посадка	Начало ОТО (Ф-Б)	Красная штриховая линия
8	Тб	На ОТО (Ф-Б)	Начало ОТО (Ф-Б)	Сюмчанке ОТО	Синяя сплошная линия с пометкой "Ф-Б"
9	Оп	Ожидание ЦТЗ (Ф-1,2,3)	Посадка	Начало ЦТЗ (Ф-1,2,3)	Красная штриховая линия с пометкой "Ф-1,2,3"

Окончание табл. I

№ состо-яния	Виды состо-яния	Наименование состояния	Границы состояния		Условие обозначения состояния на экспорт-черской промке
			начало	окончание	
IC	Тп	На ПТО (ч-1,2,3)	Начало ПТО (ч-1,2,3)	Окончание ПТО (ч-1,2,3)	Синяя сплошная линия с пометкой "1,2,3"
II	Ш	Переводы в работу	Начало переводов	Конец переводов	Красная штриховая линия
I2	ОР	Ожидание капитального ремонта	Окончание ОТС после последнего полета	Вылет в ремонт	Коричневая штриховая линия
I3	К	В капитальном ремонте	Вылет в ремонт	Посадка после ремонта	Коричневая сплошная линия
I4	З	Простой из-за отсутствия зап. частей	Прекращение ТО	Возобновление ТО	Красная сплошная линия
I5	Дв	Простой из-за отсутствия двигателя	Прекращение ТО	Возобновление ТО	Красная сплошная линия с пометкой "Дв"
IC	Д	Доработка по билетам	Начало работ	Окончание работ	Синяя штриховая линия
I7	Б	Рекомендации промышленности	Обнаружение неисправности	Устранение неисправности	Красная штрих-пунктирная линия
I8	Ур	Рекомендации рем.заводу	Обнаружение неисправности	Устранение неисправности	Красная штрих-пунктирная линия с пометкой "ГА"
I9	Л	Расстелование ЛП	Монтаж контрольных проистеств	Окончание расстелования	Красная штрих-пунктирная линия с пометкой "расст."
20	В	Восстановление после ЛП	Окончание расстелования	Готовность ЛА	Красная штрих-пунктирная линия
21	С	На списании	Посадка после последнего полета	Дата отказа с списанием ЛА	Желтая сплошная линия

тивать их влияние на все показатели процесса. Так, например, с целью повышения эффективности использования ЛА часто прибегают к сокращению простоев авиационной техники на ТО и Р, что, в конечном итоге, может привести к снижению безопасности полетов.

Анализ эффективности ПТЭ ведется с использованием единичных, обобщенных и относительных показателей, характеризующих уровень безопасности полетов, регулярность вылетов, интенсивность и экономичность использования ЛА, затраты труда, времени и средств на ТО и Р. В зависимости от поставленной задачи предпочтение отдается той или иной группе показателей. Так, при анализе эффективности использования ЛА применяются показатели, характеризующие время пребывания ЛА в различных состояниях ПТЭ.

С целью углубления анализа парк ЛА разделяется на три группы. В первую включаются ЛА, находящиеся в рейсе и на оперативном ТО (состояния Р, Г, А, М, Е, У, Об, Тб). Данная группа ЛА охвачена процессом  $Q_1$ , эффективность которого характеризует совершенство производственной деятельности оперативных цехов АТБ. Вторая группа включает ЛА, отнесенные к первой группе, а также находящиеся на периодическом ТО (состояния Он, Тн, Ш, З, Лв, Ж, Яр, Л, В, С). Данная группа ЛА охвачена процессом  $Q_2$ , эффективность которого характеризует деятельность эксплуатационного предприятия (АТБ). Третья группа дополняется ЛА, находящимися в капитальном ремонте (состояния ОР, Кр). Эффективность соответствующего процесса  $Q_3$  характеризует совершенство системы ТЭ в целом (эксплуатационного и ремонтного предприятий).

Расчет показателей эффективности ПТЭ проводится отдельно для каждого типа ЛА и уровня организационной структуры ( $Q_1, Q_2, Q_3$ ) в масштабах одного эксплуатационного предприятия (АТБ).

Периодичность проведения анализов зависит от потребностей в его результатах (декада, месяц, квартал, год).

Расчеты базируются на статистических данных, содержащихся в учебно-отчетной документации АТБ (лиспетчерском графике ПЦО). Исходные данные сводятся в табл. 2.

Единичные показатели, характеризующие эффективность использования ЛА, рассчитываются по формулам:

$$\pi_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^N n_i}, \quad (1)$$

где  $\pi_i$  — частота попадания в  $i$ -е состояние,

$n_i$  — общее число попаданий в  $i$ -е состояние,

$N$  — число выделенных состояний ПТЭ;

$$\mu_i = \frac{t_i}{n_i}, \quad (2)$$

где  $\mu_i$  - среднее время пребывания в  $i$ -м состоянии,  
 $t_i$  - общее время пребывания в  $i$ -м состоянии.

Результаты расчетов заносятся в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Исходные данные и результаты расчета единичных показателей ПТЭ ( $Q_1, Q_2, Q_3$ )

№ состо- ояния	Шифр состо- ояния	Исходные данные		Расчетные значения показателей			Место состояния
		$n_i$	$t_i$	$\pi_i$	$\mu_i$	$\pi_i \mu_i$	
1	P*	$n_1$	$t_1^p / t_1^n$	$\pi_1$	$\mu_1^p / \mu_1^n$	$\pi_1 \mu_1^p / \pi_1 \mu_1^n$	
2	B	$n_2$	$t_2$	$\pi_2$	$\mu_2$	$\pi_2 \mu_2$	
3	M	$n_3$	$t_3$	$\pi_3$	$\mu_3$	$\pi_3 \mu_3$	

и т. д.

Обобщенные показатели, характеризующие эффективность использо-  
 вания ЛА, рассчитываются по формулам:

$$K_{\text{ин}} = \frac{\pi_1 \mu_1^n}{\sum_{i=1}^N \pi_i \mu_i} \quad (3)$$

где  $K_{\text{ин}}$  - показатель использования ЛА по назначению,  
 $\pi_i, \mu_i^n$  - частота попадания в состояние P и среднее время  
 пребывания в полете,  
 $\pi_i, \mu_i$  - параметры состояний ПТЭ,  
 $N$  - число выделенных состояний;

$$K_{\text{эф}} = \frac{\pi_1 \mu_1^p}{\sum_{i=1}^N \pi_i \mu_i} \quad (4)$$

\* Для состояния P дополнительно указываются общее  $t_1^n$  и сред-  
 нее  $\mu_1^n$  время пребывания в полете.



где  $K_{ип}$  - показатель использования ЛА в рейсах,  
 $\mu_i, \mu_i^p$  - частота попадания и среднее время пребывания в состоянии Р;

$$K_{ви} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} \pi_i \mu_i}{\sum_{i=1}^{N_i} \pi_i \mu_i^p}, \quad (5)$$

где  $K_{ви}$  - показатель возможного использования ЛА (готовности),  
 $\pi_j, \mu_j$  - частота попадания и среднее время пребывания в состояниях Р, Е, Г, А, М;

$$K_{пи} = \frac{\sum_{\gamma=1}^{N_{\gamma}} \pi_{\gamma} \mu_{\gamma}}{\pi_1 \mu_1^n}, \quad (6)$$

где  $K_{пи}$  - показатель удельных простоев исправных ЛА;  
 $\pi_{\gamma}, \mu_{\gamma}$  - частота попаданий и среднее время пребывания в состояниях Е, М, Г, А;

$$K_{пр} = \frac{\mu_1^p - \mu_1^n}{\mu_1^n}, \quad (7)$$

где  $K_{пр}$  - показатель удельных простоев ЛА при выполнении рейсов, ч. на ч.налета;

$$K_{пт} = \frac{\sum_{k=1}^{N_k} \pi_k \mu_k}{\pi_1 \mu_1^n}, \quad (8)$$

где  $K_{пт}$  - показатель удельных простоев ЛА в состояниях ТО и Р, ч. на ч.налета,

$\pi_k, \mu_k$  - частота попаданий и среднее время пребывания в состояниях Об, Тб, У, Оп, Тп, Ш, Ор, Кр, З, Дв, Д, Эр, Ж, Л, В, С.

Оценка эффективности ПТЭ проводится с использованием относительных показателей  $\bar{K}_i$  :

$$\bar{K}_i = \frac{K_i_{расч}}{K_i_{баз}} \cdot 100\% \quad (\text{для показателей } K_{ин}, K_{ип}, K_{ви}), \quad (9)$$

где  $K_i_{расч}, K_i_{баз}$  - расчетные и базовые (нормативные) значения обобщенных показателей;

$$\bar{K}_i = \frac{K_{i\text{баз}}}{K_{i\text{расч}}} \cdot 100\% \quad (\text{для показателей } K_{\text{ви}}, K_{\text{пр}}, K_{\text{пт}}). \quad (10)$$

В качестве  $K_{i\text{баз}}$  обычно принимается значение соответствующего показателя за предыдущий период эксплуатации (до введения мероприятий по совершенствованию ПТЭ).

Значение  $\bar{K}_i < 100\%$  означает снижение эффективности ПТЭ по соответствующему показателю. Результаты расчета обобщенных и относительных показателей ПТЭ сводятся в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Результаты расчета обобщенных и относительных показателей ПТЭ ( $Q_1, Q_2, Q_3$ )

Характер показателя	Показатели					
	$K_{\text{ви}}$	$K_{\text{пр}}$	$K_{\text{ви}}$	$K_{\text{пт}}$	$K_{\text{пр}}$	$K_{\text{пт}}$
Расчетный						
Базовый (нормативный)						
Относительный (фактический)						
Расчетный (ожидаемый)						
Относительный (ожидаемый)						

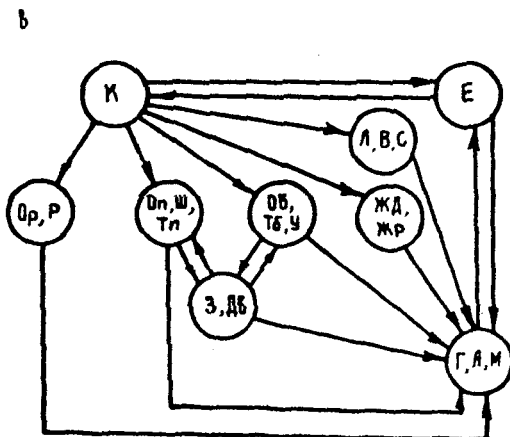
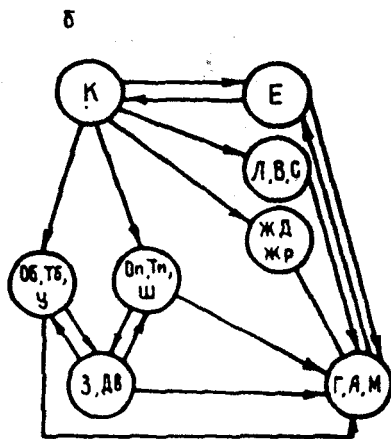
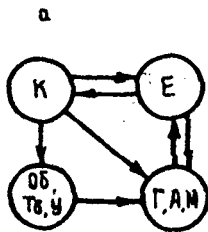
Анализ структуры ПТЭ проводится с использованием графической модели, получившей название "Граф состояний и переходов ПТЭ". Модель процесса наглядно иллюстрирует схему переходов (рис. 1) и распределение ЛА по различным состояниям, что позволяет вести целенаправленную корректировку его структуры.

Построение модели ПТЭ базируется на статистических данных, содержащихся в учетно-отчетной документации АТБ (диспетчерском графике ПДО). Исходные данные сводятся в табл. 4. Общие и относительные частоты переходов  $\pi_{ik}$  и  $\bar{\pi}_{ik}$  рассчитываются по формулам:

$$\pi_{ik} = \frac{n_{ik}}{n_i} ,$$

где  $n_{ik}$  — общее число переходов из  $i$ -го в  $k$ -е состояние,

$n_i$  — общее число попаданий в  $i$ -е состояние;



Р и с. 1. Укрупненная схема переходов процесса технической эволютации: а - процесс  $Q_1$ ; б - процесс  $Q_2$ ; в - процесс  $Q_3$ .

$$\bar{\pi}_{i,k} = \pi_i \pi_{i,k} ,$$

где  $\pi_i$  - частота попаданий в  $i$ -е состояние (см. табл. 2).

Результаты расчета заносятся в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Исходные данные и результаты расчета  
частот переходов ПТЭ

№ сос- ояния	Цикл состо- яния	Номер состояния, количество и частоты переходов									
		1			2			3			и т.д.
		$n_{1,k}$	$\pi_{1,k}$	$\bar{\pi}_{1,k}$	$n_{2,k}$	$\pi_{2,k}$	$\bar{\pi}_{2,k}$	$n_{3,k}$	$\pi_{3,k}$	$\bar{\pi}_{3,k}$	
1	К										
2	Б										
3	М										
и т.д.											

На основе табл. 2 и 4 проводится построение модели ПТЭ. В начальную вершину графа вводится целевое состояние процесса (К), затем в соответствии с табл. 4 вводятся остальные состояния (вершины). Вершины соединяются стрелками (ребрами) в соответствии со схемой переходов. Над ребрами указываются частоты переходов  $\bar{\pi}_{i,k}$ , а у вершин - параметры состояний  $\pi_i \mu_i$  (табл. 2).

Анализ эффективности ПТЭ проводится с целью вскрытия и рационального использования резервов производства и, в частности, планирования мероприятий, направленных на повышение эффективности использования ЛА. Для этого выделяются доминирующие состояния (состояния, имеющие наиболее высокие значения параметров  $\pi_i \mu_i$ , а также состояния, параметры которых ухудшились за отчетный период). Начиная с доминирующих состояний, приступают к разработке мероприятий, направленных на совершенствование ПТЭ.

Сущность таких мероприятий заключается в разработке организационных и технических предложений, направленных на сокращение "вынужденных" простоев ЛА.

Так, например, с целью сокращения простоев ЛА в ожидании запасных частей и двигателей (З, Дв) предлагается автоматизированная сис-



тема учета и планирования материально-технического снабжения предприятия; с целью сокращения простоев на устранение неисправностей (У) – автоматизированная система технического диагностирования (ТД), обеспечивающая оперативное выявление дефектов; с целью сокращения простоев на ТО и Р (Тб, Тп, КР) – изменение структуры ПТЭ с введением проверок технического состояния ЛА до начала проведения работ и т.г.

Эффективность предлагаемых мероприятий оценивается по изменению соответствующих показателей ПТЭ. Для этого составляется таблица исходных данных, в которую вводятся ожидаемые изменения параметров состояний, а также результаты расчета показателей  $K_{i_{ож}}$  и  $K_{i_{ок}}$ .

#### Пример проведения анализа эффективности ПТЭ

Методику проведения анализа рассмотрим на примере эксплуатации самолетов Ту-154 (19 шт.), принадлежащих Самарскому авиапредприятию (а/п Курумоч). Эффективность ПТЭ ( $Q_3$ ) анализируется за одни сутки (23.04.90 г.) по показателям  $K_{up}$  и  $K_{ви}$ .

В качестве базовых значений показателей используются значения соответствующих показателей за аналогичные сутки предшествующего года ( $K_{up баз} = 0,42$ ;  $K_{ви баз} = 0,75$ ).

1. На основе диспетчерского графика ЦДО АТБ (рис. 2) подготавливаем исходные данные для проведения расчета единичных показателей. При расшировке графика учитываем условные обозначения и признаки границ отдельных состояний, приведенные в табл. 1.

Для каждого самолета (строки графика) определяем число попаданий и время пребывания в различных состояниях ПТЭ. Исходные данные сводим в табл. 5.

2. На основе исходных данных в соответствии с (1) и (2) рассчитаем значения единичных показателей  $\pi_i$  и  $\mu_i$  для каждого из выделенных состояний. Результаты расчета сводим в табл. 5.

3. В соответствии с (4) и (5) рассчитаем значения обобщенных и относительных показателей. Результаты расчета сводим в табл. 6.

4. Результаты расчетов указывают на то, что 34% времени самолеты находились в рейсе, а 67% времени – в исправном состоянии (готовности). По отношению к аналогичным суткам предыдущего года эффективность ПТЭ ухудшилась по обоим показателям ( $K_{up} = 81\%$ ,  $K_{ви} = 89\%$ ).

5. Доминирующими состояниями ПТЭ (по величине  $\pi_i$ ;  $\mu_i$  за анализируемые сутки являются: простой в ожидании рейса (А), простой из-за отсутствия двигателей (Дв), простой на периодических формах ТО (Тп).

6. С целью повышения эффективности ПТЭ планируются следующие мероприятия:

корректировка расписания полетов;

Т а б л и ц а 5

Исходные данные и результаты расчета  
единичных показателей ПТЭ ( $Q_2$ )

№ состо- ояния	Штук состо- яния	Исходные данные		Расчетные значения единичных показателей			Место состо- яния
		$n_i$	$t_i$	$\pi_i$	$\mu_i$	$\pi_i \mu_i$	
1	Р	17	169	0,31	9,94	3,08	1
2	Е	10	17	0,18	1,7	0,31	6
3	Г	1	12	0,02	0,12	0,25	7
4	А	19	142	0,34	7,47	2,5	2
5	У	2	12	0,04	6,0	0,24	8
6	Тб	1	6	0,02	6,0	0,12	9
7	Тп	2	26	0,04	13,0	0,52	4
8	КР	1	24	0,02	24,0	0,48	5
9	Дв	2	48	0,04	24,0	0,96	3

Т а б л и ц а 6

Результаты расчета обобщенных и относительных  
показателей ПТЭ ( $Q_3$ )

Характер показателя	Показатели	
	$K_{up}$	$K_{вы}$
Расчетный	0,34	0,67
Базовый	0,42	0,75
Относительный	0,81	0,89

совершенствование системы снабжения предприятия запасными час-  
тями (двигателями);

переход на поэтапный метод выполнения периодических форм ТО.

Эффективность планируемых мероприятий оценивается по результатам  
их реализации.

Порядок проведения занятий

1. На основе фрагмента диспетчерского графика подготавливаются  
исходные данные для проведения анализа ПТЭ.
2. Проводится расчет единичных и обобщенных показателей ПТЭ.
3. Проводится анализ эффективности ПТЭ.
4. Планируются мероприятия, направленные на совершенствование ПТЭ.

## КОНТРОЛЬ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Ц е л ь з а н я т и я – приобретение и закрепление знаний студентами по теме курса, посвященной изучению стратегий эксплуатации ТО и Р изделий по техническому состоянию, и, в частности, изучение метода оперативного контроля надежности изделий с использованием верхней границы регулирования (ВГР).

### Содержание занятия

1. Изучение метода оперативного контроля надежности изделий с использованием ВГР.
2. Проведение контроля надежности заданного объекта.

### Метод оперативного контроля надежности изделий

Стратегия эксплуатации изделий с контролем надежности (ТОСКН) является одной из наиболее распространенных стратегий ТО и Р по состоянию. Она представляет собой эксплуатацию (использование) изделий до безопасного отказа. Межремонтные ресурсы изделиям при этом не устанавливаются, а работы по ТО и Р заключаются, в основном, в выявлении и устранении возникающих отказов и неисправностей.

Применительно ко всей совокупности отдельных изделий, находящихся в эксплуатации, осуществляется оперативный контроль уровня надежности. В тех случаях, когда он ниже нормативного, проводится анализ причин понижения надежности и разрабатываются мероприятия по их устранению.



Контроль надежности осуществляется статистическим методом с использованием информации, содержащейся в учетно-отчетной документации эксплуатационных и ремонтных предприятий. В качестве основного показателя (критерия) надежности изделий используется параметр потока отказов  $w(t)$  или среднее число отказов на 1000 ч. наработки  $K_{1000}$ . Кроме того, прибегают к использованию таких показателей, как средняя наработка на отказ  $t_0$ , вероятность безотказной работы  $P(t)$  и других.

Параметр потока отказов  $w(t)$  представляет собой плотность вероятности возникновения отказов восстанавливаемых объектов и вычисляется по формуле

$$w(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \approx \frac{m(\Delta t)}{N \Delta t}, \quad (11)$$

где  $Q(t)$  - вероятность возникновения отказа,

$m(\Delta t)$  - число отказов на интервале наработки  $\Delta t$ ,

$N$  - число изделий, находящихся в эксплуатации на интервале наработки  $\Delta t$ .

Среднее число отказов (досрочных снятий с эксплуатации), произошедших на 1000 часов налета  $K_{1000}$  вычисляется по формуле

$$K_{1000} = \frac{m_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^{N_0} t_i} \cdot 1000, \quad (12)$$

где  $m_{\Sigma}$  - суммарное число отказов (снятий) за рассматриваемый период эксплуатации,

$N_0$  - общее число отказавших (снятых) изделий,

$t_i$  - наработка до отказа (снятия)  $i$ -го изделия.

В условиях отдельного эксплуатационного предприятия приходится иметь дело с ограниченным объемом статистических данных, поэтому использование показателей  $w(t)$  и  $K_{1000}$  в качестве критериев надежности не представляется возможным. Уровень надежности здесь контролируется с использованием показателя "Верхняя граница регулирования (ВГР)", который представляет собой допустимое (планируемое) из экономических соображений количество отказов  $N_{в.гр}$  для находящихся в эксплуатации однотипных изделий. Контроль надежности при этом проводится путем сравнения фактического числа отказов  $N_{ф}$  с планируемым  $N_{в.гр}$ .

Значение  $n_{\text{в гр}}$  определяется с использованием распределения Пуассона

$$P_{\text{зад}} = \sum_{n_{\text{ф}}=0}^{n_{\text{в гр}}} \frac{[\omega(t)] T_{\Sigma} a)^n}{n!} e^{-[\omega(t)] T_{\Sigma} a} \quad (13)$$

или

$$P_{\text{зад}} = \sum_{n_{\text{ф}}=0}^{n_{\text{в гр}}} \frac{([K_{1000}] T_{\Sigma} a \cdot 10^{-3})^n}{n!} e^{-[K_{1000}] T_{\Sigma} a \cdot 10^{-3}}, \quad (14)$$

где  $P_{\text{зад}}$  - заданная вероятность непревышения фактического потока отказов  $\omega(t)$  или  $K_{1000}$  при  $n_{\text{ф}}=n_{\text{в гр}}$  их плановых значений  $[\omega(t)]$  или  $[K_{1000}]$ ;

$T_{\Sigma}$  - суммарный налет ЛА за отчетный период эксплуатации, ч;

$a$  - число однотипных изделий на ЛА.

Выполнение неравенства  $n_{\text{ф}} < n_{\text{в гр}}$  служит основанием для продолжения нормальной эксплуатации изделий по стратегии ТОСКИ. При  $n_{\text{ф}} > n_{\text{в гр}}$  изделия заносятся в список ненадежных. Для них разрабатываются мероприятия, направленные на повышение надежности. Эффективность мероприятий оценивается по изменению  $n_{\text{ф}}$ .

По содержанию мероприятия по повышению надежности можно разделить на конструктивные и эксплуатационные.

К типовым конструктивным мероприятиям относятся:

предложения к промышленности по доработке (усилению) конструкции изделия;

установка на ЛА дополнительных средств сигнализации отказов и другие.

К типовым эксплуатационным мероприятиям относятся:

введение ограничений на режимы эксплуатации изделий;

проведение дополнительных проверок, регулировок и калибровок изделий и другие.

Если путем проведенных мероприятий надежность изделий повысить не удастся, то они заносятся в список наиболее ненадежных. Для них временно устанавливаются межремонтные ресурсы, т.е. осуществляется перевод на другую стратегию эксплуатации (ТОНАР).

Данные, используемые для контроля надежности изделий выбираются из карточек учета отказов и заносятся в сводный таблицу (табл. 7).

Т а б л и ц а 7

Сводный табель данных для контроля надежности  
(указать наименование системы)

№ п/п	Наименование изделий	Тип изделий	$T_x$	$\alpha$	$(\omega(t))$	$n_{\phi}$	Характер отказов
1							
2							
и т.д.							

Результаты контроля надежности оформляются в виде ежемесячного (квартального, годового) отчета (табл. 8). В отчете указывается результат оценки уровня надежности (положительный или отрицательный), гипотеза о причине снижения надежности, а также содержание мероприятий по повышению надежности.

Т а б л и ц а 8

Отчет по контролю надежности  
(указать наименование системы)

№ п/п	Наименование изделий	Тип изделий	Результат контроля надежности			Гипотеза о причине снижения надежности. Содержание мероприятий.
			$n_{\phi}$	$n_{\psi гр}$	оценка	
1						
2						
и т.д.						

#### Пример контроля надежности

Методику контроля надежности рассмотрим на примере системы кондиционирования воздуха (СКВ) самолета ТУ-154 (по данным АТБ а/п Курумоч).

1. Данные, необходимые для проведения контроля, заносим в сводный табель (табл. 9).

2. Приняв  $R_{зад} = 0,975$ , согласно (12) выполним расчет ВР для комплектующих изделий.

Для распределения воздуха (agr. 513) имеем

Сводный табель данных для контроля надежности  
СКВ самолета Ту-154 за II квартал 1990г.

№ п/п	Наименование изделия	Тип изделия	$T_x$	$\alpha$	$n_{\phi}$	$[K_{1000}]$	Характер отказа
1	Распределитель воздуха	5I3	10168	5	7	0,047	Заклинивание заслонки, отказ эл. привода
2	Фиксируемый обратный клапан	5I02	10168	4	3	0,065	—"
3	Турбоохладитель	I62IT	10168	2	1	0,012	Разрушение подшипников опор
4	Кран наддува	4602	10168	3	6	0,117	Заклинивание заслонки, отказ эл. привода

$$0,975 = \sum_{n=0}^{n_{\text{гр}}} \frac{(0,047 \cdot 10168 \cdot 5 \cdot 10^{-3})^n}{n!} e^{-0,047 \cdot 10168 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}$$

$$0,975 = \sum_{n=0}^{n_{\text{гр}}} \frac{2,4^n}{n!} e^{-2,4} = e^{-2,4} + \frac{2,4}{1!} e^{-2,4} + \frac{2,4^2}{2!} e^{-2,4} + \frac{2,4^3}{3!} e^{-2,4} + \dots$$

$0,975 < 0,964$  при ( $n = 5$ ),  $0,975 > 0,981$  при ( $n = 6$ ).

Принимаем  $n_{\text{гр}} = 5,5$ .

Аналогично рассчитываем ВР и для других агрегатов:

для фиксируемого обратного клапана (агр. 5I02)  $n_{\text{гр}} = 6,5$ ;

для турбоохладителя (агр. I62IT)  $n_{\text{гр}} = 1,5$ ;

для крана наддува (агр. 4602)  $n_{\text{гр}} = 7,5$ .

3. Занесем результаты расчетов в отчет (табл. 10).

4. Результаты контроля надежности указывают на то, что из четырех изделий три отвечают требованиям надежности, а одно — агр. 5I3 имеет недостаточный уровень надежности.

Инженерный анализ отказов распределителя воздуха (агр. 5I3) позволил установить следующее:

отказы проявляются в нарушениях регулирования температуры воздуха в магистралях системы;

Т а б л и ц а 10

Отчет по контролю надежности СКВ самолета Ту-154  
за II квартал 1990 г.

№ п/п	Наименование изделий	Тип изделий	Результаты контроля надежности			Типотеза о причине снижения надежности. Содержание мероприятия
			№ ф	№ гр	оценка	
1	Распределитель воздуха	513	7	5,5	Отрицат.	Влияние сезонности, дополнительная проверка потребляемого тока
2	Фиксируемый обратный клапан	5102	3	6,5	Положит.	Нормальная эксплуатация
3	Турбохолодильник	1621Т	1	1,5	Положит.	"-
4	Кран наддува	4602	6	7,5	Положит.	"-

связаны с повреждениями электрического привода или заклиниванием воздушных заслонок;

возникают преимущественно при переходе на весенне-летнюю навигацию.

Для повышения надежности агрегата предлагается:

ввести периодические проверки потребляемого электрического тока;  
ввести проверки технического состояния заслонок при подготовке  
ЛА к весенне-летней навигации.

#### Порядок проведения занятия

1. Ознакомиться с устройством и содержанием ТО заданного объекта.
2. Составить сводный таблиць данных для контроля надежности объекта.
3. Рассчитать значения БР и провести контроль надежности комплектующих изделий.
4. Провести анализ полученных результатов.
5. Разработать мероприятия по повышению надежности объекта.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УПРЕЖДАЮЩИХ ДОПУСКОВ НА КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИЗДЕЛИЙ

Ц е л ь з а н я т и я - приобретение и закрепление знаний студентами по теме курса, посвященной выбору режимов диагностирования изделий, и, в частности, изучение метода определения величины упреждающих допусков на контролируемые параметры (УДП) при переходе на эксплуатацию по состоянию.

### Содержание занятия

1. Изучение метода определения УДП.
2. Определение УДП для заданного объекта.

### Метод определения упреждающего допуска

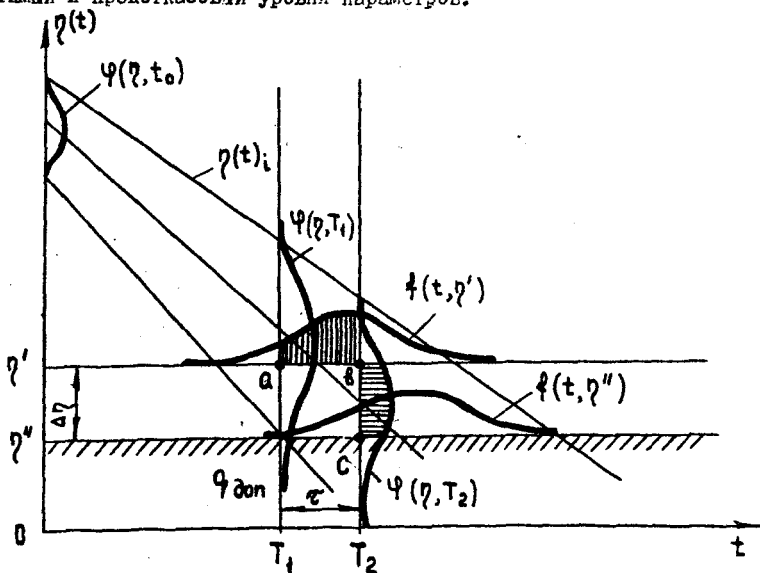
Стратегия ТО и Р с контролем параметров (ТОСКП) базируется на непрерывном или периодическом диагностировании состояния изделий, находящихся в эксплуатации. Диагностирование осуществляется путем контроля текущих значений параметров изделий с использованием штатных (встроенных) или наземных (внешних) средств контроля.

Режим диагностирования определяется при этом составом контролируемых параметров, их предельно допустимыми (граничными) и предотказовыми значениями, а также средствами и периодичностью проведения проверок.

При переводе изделий на эксплуатацию по состоянию решается задача установления оптимальных режимов диагностирования с учетом требований, предъявляемых к процессу их технической эксплуатации. Для изделий авиационной техники основным критерием оптимальности режима обычно служит вероятность безотказной работы  $P_{зд}$ .

Задача оптимизации режима диагностирования в этом случае формулируется следующим образом. Имеется некоторый объект диагностирования и формальное описание процесса  $\eta(t)$  изменения его технического состояния с наработкой. Требуется по заданной периодичности проверок  $T$  и вероятности  $P_{зд}$  определить величину УДП и, в частности, значение его верхней границы  $\eta'$ .

Процесс изменения состояния изделий с наработкой  $t$ , а следовательно и значений контролируемых параметров  $\eta$ , обычно протекает монотонно. Скорость накопления повреждений  $\frac{d\eta}{dt}$  является величиной случайной и зависит от начальных свойств изделия и условий его эксплуатации. Переход изделия из одного состояния в другое происходит дискретно в момент пересечения процессом  $\eta(t)$  установленных уровней, разделяющих эти состояния (рис. 3). Различают предельно допустимый и предотказовый уровни параметров.



Р и с. 3. Связь периодичности проверок и величины упреждающего допуска

Предельно допустимый уровень  $\eta''$  (нижняя граница УДП) определяет предельное состояние изделия, при котором оно не может далее использоваться по прямому назначению по техническим или экономическим соображениям.

Предотказовый уровень  $\eta'$  (верхняя граница УДП) определяет неисправное состояние изделия, при котором оно подлежит профилактической замене или восстановлению.

Упреждающий допуск на параметр (УДП)  $\Delta\eta = \eta' - \eta''$  характеризует запас работоспособности изделия, обеспечивающий его безотказную работу до очередной проверки.

Значение  $\zeta''$  рассчитывается с использованием статистических методов, например, метода минимального риска, или задается по техническим соображениям. Значение  $\zeta'$  рассчитывается с использованием прогнозных моделей на основе статистических данных, характеризующих изменение состояния однотипных моделей с наработкой. Прогнозная модель представляет собой формальное описание процесса  $\zeta(t)$  - изменения численных значений контролируемых параметров изделий с наработкой.

При этом область значений параметров  $\overline{\infty, \zeta'}$  определяет работоспособные, область  $\zeta', \zeta''$  - предотказные (неисправные), а область  $\zeta'', 0$  - неработоспособные (отказовые) состояния изделий. В момент  $t = T$  случайный процесс  $\zeta(t)$  соответствует работоспособному состоянию изделия с вероятностью  $P_1 = P(\infty > \zeta > \zeta')$ , предотказовому с вероятностью  $P_2 = P(\zeta' > \zeta > \zeta'')$  и отказовому с вероятностью  $P_3 = P(0 < \zeta \leq \zeta'')$ . Таким образом, распределение процесса  $\zeta(t)$  по состояниям подчиняется условию нормировки  $P_1 + P_2 + P_3 = 1$ .

Если в момент  $t = T$  выполняется проверка, то при  $\zeta(T) > \zeta'$  выдается команда на дальнейшую эксплуатацию, при  $\zeta' \geq \zeta(T) > \zeta''$  - на профилактическую, а при  $\zeta(T) \leq \zeta''$  - на аварийную замену изделия.

Предположим, что в результате статистического исследования (серийной эксплуатации) изделий получено формальное описание процесса  $\zeta(t)$  и определено значение  $\zeta''$ . Тогда задача состоит в определении связи периодичности проверок  $\tau = T_2 - T_1$  и значения  $\zeta'$ .

Проверки состояния изделий играют роль своеобразного экрана, прозрачного при  $\zeta(T) > \zeta'$  и поглощающего при  $\zeta(T) \leq \zeta'$ . Значение  $\zeta'$  должно быть выбрано таким образом, чтобы в очередном цикле эксплуатации после проверки изделия значение  $\zeta$  с заданной вероятностью  $P_{зад}$  не вышло за границу  $\zeta''$ , т.е. выполнялось условие

$$P(\zeta > \zeta') \geq P_{зад} \quad (15)$$

В силу случайного характера протекания процесса  $\zeta(t)$  значения  $\zeta$  к моментам  $T_1$  и  $T_2$  распределены нормально с плотностями  $\varphi(\zeta, T_1)$  и  $\varphi(\zeta, T_2)$ . С другой стороны, уровни  $\zeta'$  и  $\zeta''$  пересекаются процессом  $\zeta(t)$  в случайные моменты  $t$ , распределенные по нормальному закону с плотностями  $f(t, \zeta')$  и  $f(t, \zeta'')$ .

Пусть  $T_1$  и  $T_2$  - соответственно моменты первой и второй проверок, а  $t$  - случайный момент пересечения процессом  $\zeta(t)$  уровней  $\zeta'$  или  $\zeta''$ . Очевидно, что  $t < T_1$  при  $\zeta > \zeta'$ , а  $t \leq T_2$  при  $\zeta \leq \zeta''$ . Переходя к плотностям распределений, это условие можно записать в виде равенства вероятностей:



$$\int_{T_1}^{T_2} f(t, \eta') dt = \int_{\eta'}^{\eta''} \varphi(\eta, T_2) d\eta. \quad (16)$$

Выражение (16) означает, что все траектории процесса  $f(t)$ , прошедшие через горизонтальный экран (а в), попадают на вертикальный экран (в с).

Момент первой проверки  $T_1$  определяется с учетом (15):

$$q(\eta \leq \eta'', T_1) = \int_0^{\eta''} \varphi(\eta, T_1) d\eta = 1 - P_{3од} = q_{3од}. \quad (17)$$

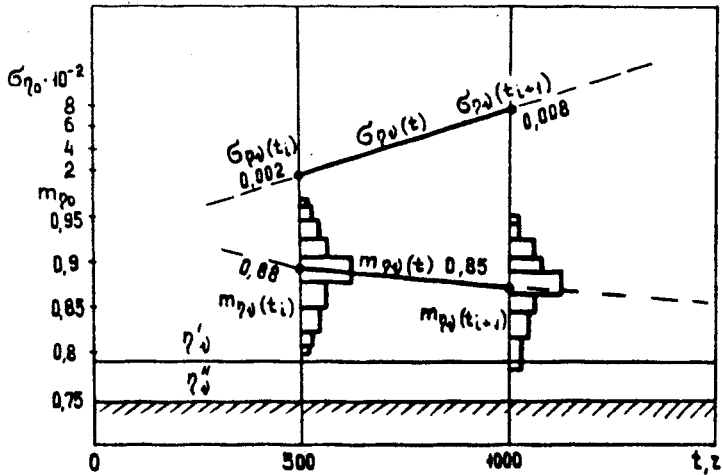
Процессы, связанные с накоплением повреждений (износ, старение, усталость), обычно хорошо аппроксимируются линейной зависимостью вида  $y = a + bx$ . Математические ожидания случайной величины  $m\eta(t)$  и среднеквадратические отклонения  $\sigma\eta(t)$  для наработки  $t$  при этом определяются из выражений

$$\begin{aligned} m\eta(t) &= m_a + m_b t, \\ \sigma\eta(t) &= \sigma_a + \sigma_b t. \end{aligned} \quad (18)$$

Постоянные коэффициенты  $m_a, m_b, \sigma_a$  и  $\sigma_b$  определяются с использованием данных серийной эксплуатации изделий (рис. 4) из выражений:

$$\begin{aligned} m_b &= \frac{m\eta(t_{i+1}) - m\eta(t_i)}{t_{i+1} - t_i}, \\ m_a &= \frac{t_{i+1} m\eta(t_i) - t_i m\eta(t_{i+1})}{t_{i+1} - t_i}, \\ \sigma_a &= \frac{t_{i+1} \sigma\eta(t_i) - t_i \sigma\eta(t_{i+1})}{t_{i+1} - t_i}, \\ \sigma_b &= \frac{\sigma\eta(t_{i+1}) - \sigma\eta(t_i)}{t_{i+1} - t_i}, \end{aligned} \quad (19)$$

где  $m\eta(t_i), m\eta(t_{i+1}), \sigma\eta(t_i), \sigma\eta(t_{i+1})$  — математические ожидания и среднеквадратические отклонения параметра  $\eta$  при наработках  $t_i$  и  $t_{i+1}$



Р и с. 4. Гистограммы распределения  $\Psi(\eta, t)$  и моменты функции  $m_{\Psi}(t), \sigma_{\Psi}(t)$  при  $t > 500$  ч.

Подставив в (17) плотность  $\Psi(\eta, T_1)$  для нормального закона, проведя интегрирование и необходимые преобразования с учетом (18), получим зависимость  $T_1 = f(P_{зад})$ :

$$\int_0^{\eta''} \Psi(\eta, T_1) d\eta = \Phi^* \left\{ \frac{\eta'' - m_a - m_b T_1}{\sigma_a + b T_1} \right\} = 1 - P_{зад} = \Phi^* \{ U_{q_{зад}} \},$$

откуда

$$\Phi \left\{ \frac{\eta'' - m_a - m_b T_1}{\sigma_a + b T_1} \right\} = \Phi \{ U_{q_{зад}} \},$$

$$\frac{\eta'' - m_a - m_b T_1}{\sigma_a + b T_1} = U_{q_{зад}},$$

$$T_1 = \frac{\eta'' - m_a - U_{q_{зад}} \sigma_a - b \sigma_a}{m_b + U_{q_{зад}} b} \quad (20)$$

где  $U_{q_{дон}}$  - квантиль нормального распределения, соответствующий допустимой вероятности "отказа" ( $q_{дон}$ ).

Аналогично с учетом (16) и (18) получаем зависимость

$$h' = \frac{h''(\sigma_a + \sigma_g T_1) - (m_g \sigma_a - m_a \sigma_g) T}{\sigma_a + \sigma_g T_1 + \sigma_g T} \quad (21)$$

### Пример определения УДЦ

Методику определения верхней границы УДЦ рассмотрим на примере плунжерного насоса ПН-45М гидравлической системы самолета Ту-134.

1. С использованием стандартной методики оценки надежности [3] для фиксированных значений наработки 500 ч и 1000 ч определим математические ожидания  $m\gamma$  (500),  $m\gamma$  (1000) и средние квадратические отклонения  $\sigma\gamma$  (500),  $\sigma\gamma$  (1000) объемного КПД насоса (см. рис. 4):

$$\begin{aligned} m\gamma(500) &= 0,884; & \sigma\gamma(500) &= 0,002; \\ m\gamma(1000) &= 0,853; & \sigma\gamma(1000) &= 0,008. \end{aligned}$$

2. Используя (19), определим значения постоянных коэффициентов  $m_a, m_g, \sigma_a, \sigma_g$ :

$$m_a = \frac{1000 \cdot 0,884 - 500 \cdot 0,853}{1000 - 500} = 0,915;$$

$$m_g = \frac{0,853 - 0,884}{1000 - 500} = -0,62 \cdot 10^{-4};$$

$$\sigma_a = \frac{1000 \cdot 0,002 - 500 \cdot 0,08}{1000 - 500} = 0,12 \cdot 10^{-4};$$

$$\sigma_g = \frac{0,08 - 0,002}{1000 - 500} = 0,12 \cdot 10^{-4}.$$

3. Поставив значения коэффициентов в (18), получим моментные функции для наработки более 500 ч:

$$m\gamma(t) = 0,915 - 0,62 \cdot 10^{-4} t;$$

$$\sigma\gamma(t) = 0,02 + 0,12 \cdot 10^{-4} t.$$

4. Задаввшись по ТУ насоса  $\eta_n^* = 0,75$  и  $P_{зад} = 0,999$  ( $U_{ф.пол} = -3,1$ ), согласно (20) определим момент проведения первой проверки  $T_i$ :

$$T_i = \frac{0,75 - 0,915 + 3,1 \cdot 0,02}{-0,62 \cdot 10^{-4} - 3,1 \cdot 0,12 \cdot 10^{-4}} = 1038 \text{ ч.}$$

5. Исходя из принятой периодичности ТО самолета, задаемся периодичностью проверок насоса  $T = 300$  (Ф-1), согласно (21) определяем значение верхней границы УДП:

$$\eta_n^* = \frac{0,75(0,02 + 0,12 \cdot 10^{-4} \cdot 1038) - (-0,62 \cdot 10^{-4} \cdot 0,02 - 0,915 \cdot 0,12 \cdot 10^{-4}) \cdot 300}{0,02 + 0,12 \cdot 10^{-4} + 0,12 \cdot 10^{-4} \cdot 300} = 0,78.$$

6. Анализ полученных данных указывает на то, что: проверку КПД насосов, находящихся в эксплуатации, необходимо проводить, начиная с наработки 1000 ч с периодичностью 300 ч, совместив с ТО самолета по Ф-1;

в случае  $\eta_n \geq 0,78$  продолжить нормальную эксплуатацию насоса;

в случае  $0,78 > \eta_n \geq 0,75$  провести профилактическую замену насоса (допускается незначительная дополнительная наработка);

в случае  $\eta_n < 0,75$  произвести аварийную замену насоса.

#### Порядок проведения занятия

1. Ознакомиться с устройством и методикой диагностирования заданного объекта.

2. Сформулировать задачу и подготовить исходные данные для расчета УДП.

3. Рассчитать значение верхней границы УДП на контролируемый параметр и наработку до первой проверки.

4. Провести анализ полученных данных и дать рекомендации по установлению режима диагностирования объекта.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ ПРОВЕРОК ИЗДЕЛИЙ

Ц е л ь з а н я т и я - приобретение и закрепление знаний студентами по теме курса, посвященной выбору режимов диагностирования изделий, и, в частности, изучение метода определения периодичности проверок изделий при переходе на эксплуатацию по состоянию.

### Содержание занятия

1. Изучение метода определения периодичности проверок.
2. Определение периодичности проверок заданного объекта.

### Метод определения периодичности проверок

Стратегия технического обслуживания и ремонта по состоянию с контролем параметров (ТОСКП) базируется на непрерывном или периодическом диагностировании изделий, находящихся в эксплуатации. Диагностирование осуществляется путем проверки текущих значений параметров с использованием бортовых (встроенных) или наземных (внешних) средств контроля.

Режим диагностирования, характеризуемый составом контролируемых параметров, их предельно допустимыми и предостказовыми значениями, а также периодичностью проверок, устанавливается исходя из характера отказов и условий эксплуатации изделия.

Основным критерием выбора режимов диагностирования авиационной техники служит вероятность безотказной работы изделий между проверками  $P(\tau)$ , которая должна быть выше заданной  $P_{зад}$  по техническим или экономическим соображениям

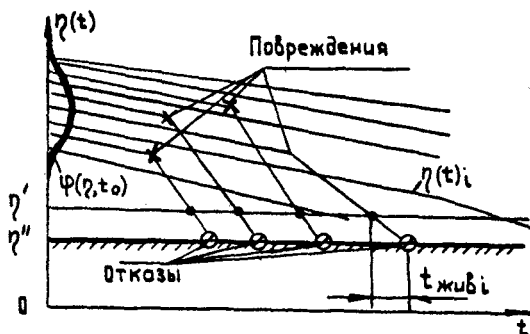
$$P(\tau) \geq P_{зад} \quad (22)$$

В случае монотонно протекающих процессов, отличающихся относительно постоянной скоростью накопления повреждений (износ, старение, усталость и т.д.), периодичность проверок изделий определяется исходя из величины упреждающего допущения на контролируемые параметры.

Однако значительная часть отказов авиационной техники обусловлена возникновением разнообразных повреждений, связанных с нарушениями условий эксплуатации или наличием в изделиях скрытых производственных дефектов.

Наличие повреждений приводит к ускорению процессов накопления

повреждений и, в конечном итоге, к возникновению "преждевременных" отказов (рис. 5). Параметры повреждений обычно имеют значительные разбросы, что обуславливает наличие значительных разбросов наработки на отказ.



Р и с. 5. Схема накопления повреждений

С целью предупреждения "преждевременных" отказов вводятся периодические проверки изделий на предмет выявления недопустимых повреждений (предотказовых состояний). Проверки обычно проводятся с использованием инструментальных (внешних) средств контроля, обеспечивающих высокую вероятность  $P_k$  выявления возникающих повреждений (надежность контроля).

Решается задача определения периодичности проверок, обеспечивающей выполнение условия (22).

В случае "идеального" контроля ( $P_k = 1$ ) вероятность отказа изделия между проверками  $Q(\tau) = 1 - P(\tau)$  определяется произведением двух вероятностей:

возникновения повреждения -  $q(\tau) = q(\tau \leq \tau')$ ;

возникновения процесса накопления повреждений с периодом развития  $t_{жизн}$  меньше принятой периодичности проверок  $\lambda(\tau) = \lambda(t_{жизн} \leq \tau)$ .

Таким образом, вероятность отказа составит

$$Q(\tau) = Q(\tau < \tau'') = q(\tau) \lambda(\tau). \quad (23)$$

В случае "реального" контроля ( $P_k < 1$ ) часть поврежденных изделий при проверке пропускается в очередной цикл эксплуатации. При этом вероятность их отказа существенно повышается. Если  $t_{жизн} \gg \tau$ , то за период развития отказа будет проведено  $n = \frac{t_{жизн}}{\tau}$  проверок

поврежденного изделия. В этом случае вероятность отказа  $Q(\tau)$  представляется в виде суммы вероятностей из-за отказа повреждений в очередном и предшествующих циклах эксплуатации:

$$Q(\tau) = q(\tau)\gamma(\tau)\beta^0 + q(\tau)\gamma(2\tau)\beta^1 + q(\tau)\gamma(3\tau)\beta^2 + \dots + q(\tau)\gamma(n\tau)\beta^{n-1} \quad (24)$$

или

$$Q(\tau) = q(\tau) \sum_{i=1}^n \gamma(i\tau) \beta^{i-1},$$

где  $\beta = 1 - P_p$  - вероятность пропуска поврежденных изделий.

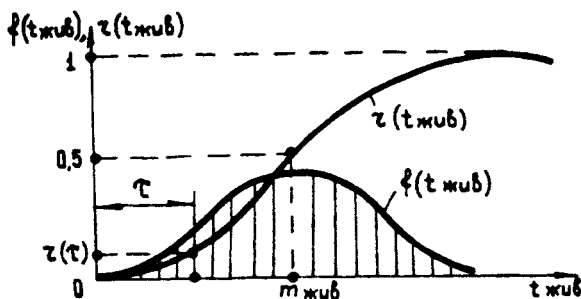
Учитывая (22) и (24), получим выражение для определения периодичности проверки:

$$Q(\tau) = 1 - P_{зад} > q(\tau) \sum_{i=1}^n \gamma(i\tau) \beta^{i-1} \quad (25)$$

Наработка изделий до отказа  $t_{жиз}$  обычно распределена по нормальному закону (рис. 6) с плотностью

$$f(t_{жиз}) = \frac{1}{\sigma_{жиз} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t_{жиз} - m_{жиз}}{2\sigma_{жиз}^2}} \quad (26)$$

где  $m_{жиз}, \sigma_{жиз}$  - математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение "живучести" изделий.



Р и с. 6. Схема определения вероятности возникновения быстротекающих процессов

Используя табличную функцию нормального распределения, вероятность  $\gamma(\tau)$  можно определить из выражения

$$\gamma(\tau) = \Phi^* \left( \frac{\tau - m_{\text{пов}}}{\sigma_{\text{пов}}} \right). \quad (27)$$

Моменты возникновения повреждений  $t_{\text{пов}}$  обычно распределены по экспоненциальному закону и вероятность  $q(\tau)$  можно рассчитать по формуле

$$q(\tau) = 1 - e^{-\lambda_{\text{пов}} \tau}, \quad (28)$$

где  $\lambda_{\text{пов}}$  — интенсивность возникновения повреждений.

Подставив (27) и (28) в (25), получим выражение для определения периодичности проверок в случае постоянной интенсивности возникновения повреждений ( $\lambda_{\text{пов}} = \text{const}$ ):

$$1 - P_{\text{зад}} \geq (1 - e^{-\lambda_{\text{пов}} \tau}) \sum_{i=1}^n \Phi^* \left( \frac{i\tau - m_{\text{пов}}}{\sigma_{\text{пов}}} \right) \beta^{i-1}. \quad (29)$$

В ряде случаев (коррозия, скрытые производственные дефекты и т.д.) моменты возникновения повреждений  $t_{\text{пов}}$ , например усталостных трещин, распределены по нормальному закону (рис. 7) с плотностью

$$f(t_{\text{пов}}) = \frac{1}{\sigma_{\text{пов}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t_{\text{пов}} - m_{\text{пов}}}{2\sigma_{\text{пов}}^2}}, \quad (30)$$

где  $m_{\text{пов}}$ ,  $\sigma_{\text{пов}}$  — математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение моментов возникновения повреждений.

Используя табличную функцию нормального распределения, вероятность  $q(\tau)$  в этом случае можно определить из выражения

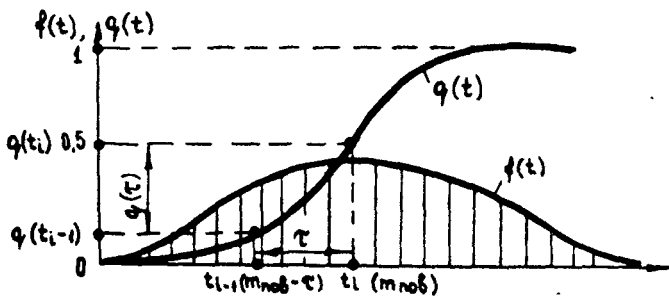
$$q(\tau) = \Phi^* \left( \frac{t_i - m_{\text{пов}}}{\sigma_{\text{пов}}} \right) - \Phi^* \left( \frac{t_{i-1} - m_{\text{пов}}}{\sigma_{\text{пов}}} \right), \quad (31)$$

где  $t_i$  — наработка к моменту текущей проверки;

$t_{i-1}$  — наработка к моменту предыдущей проверки.

Приняв в запас безотказности  $t_i = m_{\text{пов}}$  и  $t_{i-1} = m_{\text{пов}} - T$ , имеем





Р и с. 7. Схема определения вероятности повреждения

$$q(\tau) = 0,5 - \Phi^*\left(\frac{-\tau}{\sigma_{пов}}\right) = \Phi^*\left(\frac{\tau}{\sigma_{пов}}\right) - 0,5 . \quad (32)$$

Подставив (27) и (32) в (25), получим выражение для определения периодичности проверок при нарастающей интенсивности возникновения повреждений:

$$Q(\tau) = 1 - P_{зад} \geq (\Phi^*\left(\frac{\tau}{\sigma_{пов}}\right) - 0,5) \sum_{i=1}^n \Phi^*\left(\frac{i\tau - m_{жив}}{\sigma_{жив}}\right) \beta^{i-1} . \quad (33)$$

Параметры распределений  $\sigma_{жив}, m_{жив}, \sigma_{пов}, m_{пов}$  определяются с использованием стандартной методики [3] на основе статистических данных, полученных в ходе серийной эксплуатации и стендовых испытаний изделий. Надежность контроля  $P_n$  определяется путем проведения многократных проверок поврежденных изделий заданными средствами контроля. При большом числе результатов ( $N > 100$ ) вероятность пропуса  $\beta$  рассчитывается по формуле

$$\beta = 1 - P_n = 1 - \frac{m}{N} , \quad (34)$$

где  $m$  — число результатов "негоден", полученных при  $N$  проверках поврежденных изделий.

### Примеры определения периодичности проверок

Методику определения периодичности проверок проиллюстрируем на следующих примерах.

#### Пример I

В процессе эксплуатации ГТД имеют место усталостные разрушения рабочих лопаток компрессора, связанные с их повреждениями посторонними предметами, попадающими в проточную часть двигателя вместе с цикловым воздухом.

С целью предупреждения разрушений (отказов) лопаток проводятся периодические осмотры (проверки) проточной части компрессора с помощью оптических приборов (эндоскопов). Надежность контроля при этом составляет  $P_k = 0,87$ .

Требуется определить периодичность осмотров проточной части компрессора, обеспечивающую заданную вероятность безотказной работы лопаток  $P_{зад} = 0,999$ .

1. На основе данных эксплуатации и стендовых испытаний поврежденных лопаток имеем:  $\lambda_{пов} = 2 \cdot 10^{-4}$  ч,  $m_{кв} = 265$  ч,  $\sigma_{кв} = 48$  ч.

2. Используя (29), определяем периодичность проверок

$$1 - 0,999 \geq (1 - e^{-2 \cdot 10^{-4} T}) \sum_{i=1}^n \Phi^* \left( \frac{iT - 265}{48} \right) 0,13^{i-1}$$

Расчет проведем путем подстановки значений  $T$ .

$$T = 200 \text{ ч}$$

$$0,001 < (1 - e^{-2 \cdot 10^{-4} \cdot 200}) \left( \Phi^* \left( \frac{200 - 265}{48} \right) \cdot 0,13^0 + \Phi^* \left( \frac{2 \cdot 200 - 265}{48} \right) \cdot 0,13^1 + \right. \\ \left. + \Phi^* \left( \frac{3 \cdot 200 - 265}{48} \right) \cdot 0,13^2 + \Phi^* \left( \frac{4 \cdot 200 - 265}{48} \right) \cdot 0,13^3 + \dots \right)$$

$$(1 - 0,96) \cdot 0,87 + 0,098 + 0,017 + 0,002 + \dots = 0,04 \cdot 0,204 = 0,008,$$

$$0,001 < 0,008.$$

$$\tau = 150 \text{ ч}$$

$$\begin{aligned} 0,001 > (1 - e^{-2 \cdot 10^{-4} \cdot 150}) \left( \Phi^* \left( \frac{150 - 265}{48} \right) \cdot 0,13^0 + \Phi^* \left( \frac{2 \cdot 150 - 265}{48} \right) \cdot 0,13^1 + \right. \\ \left. + \Phi^* \left( \frac{3 \cdot 150 - 265}{48} \right) \cdot 0,13^2 + \Phi^* \left( \frac{4 \cdot 150 - 265}{48} \right) \cdot 0,13^3 + \dots \right) = \\ = -(1 - 0,97) \left( \Phi^*(-2,4) \cdot 1 + \Phi^*(0,73) \cdot 0,13 + \Phi^*(3,85) \cdot 0,017 + \right. \\ \left. + \Phi^*(6,9) \cdot 0,002 + \dots \right) \approx 0,03(0,008 + 0,77 \cdot 0,017 + 1 \cdot 0,002 + \dots) = \\ = 0,03 \cdot 0,023 \approx 0,0006, \\ 0,001 > 0,0006. \end{aligned}$$

В запас безотказности лопаток принимаем  $\tau = 150$  ч.

### Пример 2

В процессе эксплуатации авиационных колес имеет место усталостные разрушения барабанов. Разрушения связаны с появлением усталостных трещин из-за наличия скрытых производственных дефектов (микрорихлов). С целью предупреждения разрушений (отказов) проводится периодические проверки барабанов с помощью токовихревых дефектоскопов на предмет выявления усталостных трещин. Надежность контроля составляет  $P_k = 0,97$ . Требуется определить периодичность проверок барабанов колес, отвечающую заданной вероятности безотказной работы  $P_{зад} = 0,999$ .

1. На основе данных эксплуатации и стендовых испытаний поврежденных барабанов колес имеем:  $\sigma_{пов} = 64$  ч,  $m_{квб} = 320$  ч,  $\sigma_{квб} = 55$  ч.

2. Используя (33), определяем периодичность проверок барабанов:

$$1 - 0,999 \geq \left( \Phi^* \left( \frac{\tau}{64} \right) - 0,5 \right) \sum_{i=1}^n \Phi^* \left( \frac{i\tau - 320}{55} \right) 0,03^{i-1}.$$

Расчет проведем путем подстановки значений  $\tau$ .

$$\tau = 100 \text{ ч}$$

$$\begin{aligned} 1 - 0,999 > \left( \Phi^* \left( \frac{100}{64} \right) - 0,5 \right) \left( \Phi^* \left( \frac{100 - 320}{55} \right) \cdot 0,03^0 + \Phi^* \left( \frac{200 - 320}{55} \right) \cdot 0,03^1 + \right. \\ \left. + \Phi^* \left( \frac{300 - 320}{55} \right) \cdot 0,03^2 + \Phi^* \left( \frac{400 - 320}{55} \right) \cdot 0,03^3 + \dots \right) = \\ = \left( \Phi^*(1,56) - 0,5 \right) \left( \Phi^*(-4) \cdot 1 + \Phi^*(-2,18) \cdot 0,03 + \Phi^*(-0,36) \cdot 0,0009 + \right. \end{aligned}$$

$$+ \varphi^*(1,45) \cdot 0,27 \cdot 10^{-4} + \dots) = (0,94 - 0,5) \times 0 + 0,012 \cdot 0,03 \cdot 0,0009 + 0) \approx \\ \approx 0,44 \cdot 0,0006 = 0,0003$$

$$0,001 > 0,0003$$

$$\underline{T = 150 \text{ ч}}$$

$$1 - 0,999 < (\varphi^*(\frac{150}{64}) - 0,5) \times (\varphi^*(\frac{150-320}{55}) \cdot 0,03^2 + \varphi^*(\frac{300-320}{55}) \cdot 0,03^4 + \\ + \varphi^*(\frac{450-320}{55}) \cdot 0,03^6 + \dots) - (\varphi^*(2,34) - 0,5) \times (\varphi^*(-3,09) \cdot 1 + \\ + \varphi^*(-0,36) \cdot 0,03 + \varphi^*(2,36) \cdot 0,0009 + \dots) = (0,99 - 0,5) \times \\ \times (0,001 + 0,36 \cdot 0,03 + 0,99 \cdot 0,0009 + \dots) = 0,49 \cdot 0,0127 = 0,006;$$

$$0,001 < 0,006$$

В запас безопасности барабанов колес принимаем  $T = 100 \text{ ч}$ .

#### Порядок проведения занятия

1. Ознакомиться с устройством и методикой диагностирования заданного объекта.
2. Подготовить исходные данные для расчетов.
3. Определить периодичность проверок объекта.

#### Список рекомендуемой литературы

1. Техническая эксплуатация летательных аппаратов: Учебник для вузов / Под ред. Н.Н.Смирнова. М.: Транспорт, 1990.
2. Смирнов Н.Н., Ищкович А.А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. М.: Транспорт, 1987.
3. Мялов Е.А. Анализ эксплуатационной надежности / Куйбышев. авиац. ин-т; Куйбышев, 1987.

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

Анализ эффективности процесса технической эксплуатации ЛА .....	3
Контроль надежности изделий с использованием верхней границы регулирования .....	15
Определение величины предупреждающих допусков на контролируемые параметры изделий .....	21
Определение периодичности проверок изделий .....	28
Список рекомендуемой литературы .....	35

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ  
И РЕМОНТ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ПО СОСТОЯНИЮ**

Составитель **Макаровский Игорь Мстиславович**

Редактор **Л.Я.Чегодаева**  
Техн.редактор **Г.А.Усачова**  
Корректор **Н.С.Купрянова**

Подписано в печать 7.12.94.      Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл.печ.л. 2,1. Усл.кр.-отт. 2,2. Уч.-изд.л. 2,1.  
Тираж 200 экз. Заказ **523**. Арт.С-Эвр/94.

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П.Королева.  
443086 Самар, Московское шоссе, 34.

---

ИПО Самарского государственного аэрокосмического  
университета имени академика С.П.Королева.  
443001 Самара, ул. Ульяновская, 18.