

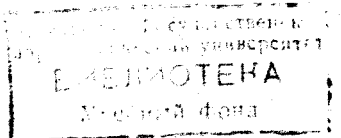
СГАУ:6(У)  
Э 414

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени академика С. П. КОРОЛЕВА

# ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

*Методические указания  
к индивидуальным занятиям*



САМАРА 1994

Составитель И.М.Маяковский

УДК 629.7.017.004

Компьютерная диагностика авиационной техники:  
Метод. указание /Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Сост.  
И.М.Маяковский. Самара, 1994. 39 с.

Рассматриваются методы определения граничных значений диагностических параметров, постановки технических требований с использованием комплексных диагностических систем, поиска неисправностей функциональных систем ЛА, контроля пригодности авиационной техники.  
Рекомендованы для студентов специальности 13.03.  
Подготовлено на кафедре ЭЛНД.

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

Рецензент канд. техн. наук Г.А.Резниченко

## АНАЛИЗ КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Ц е л ь з а н я т и я - приобретение и закрепление знаний студентами по теме курса, посвященной обеспечению контролепригодности авиационной техники (АТ); ознакомиение с методикой сбора и обработки исходных данных для проведения оценки контролепригодности; приобретение навыков в разработке мероприятий, направленных на повышение контролепригодности АТ.

### Содержание занятия

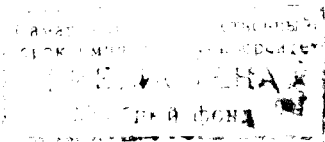
1. Изучение методов анализа контролепригодности АТ.
2. Проведение анализа контролепригодности заданного объекта.

### Контролепригодность АТ и методы ее анализа

Эффективность эксплуатации АТ во многом зависит от уровня контролепригодности изделий. При этом под контролепригодностью объекта контроля понимается совокупность свойств его конструкции, определяющих приспособленность к диагностированию заданными методами и средствами. Прежде всего это относится к методам и средствам автоматизированного и бортового контроля.

Для обеспечения контролепригодности конструирование и изготовление изделий ведется с учетом стандартизированных требований, реализация которых связывается с существенными дополнительными затратами. Следует отметить, что затраты, идущие на обеспечение контролепригодности изделий, быстро окупаются в эксплуатации за счет повышения надежности и сокращения эксплуатационных расходов [1].

В общем случае различают бортовой и наземный уровни контролепригодности. Первый характеризует соответствующие свойства объекта требования оперативного диагностирования на всех этапах полета, а второй -



требованиям диагностирования при его подготовке к полетам. На практике обычно проводятся комплексные оценки контролепригодности. Они включают анализ свойств собственно конструкции объекта, а также систем бортового (встроенного) и наземного (внешнего) контроля.

При анализе конструкции объекта изучаются состав и размещение измерительных преобразователей (датчиков), устройств сопряжения (разъемов) для подключения внешних средств контроля, а также доступность к точкам контроля и удобство его проведения. В ходе анализа учитываются требования, предъявляемые к контролепригодности изделий АТ.

При анализе бортовой системы контроля изучают состав контролируемых и регистрируемых в полете параметров, а также эргономические характеристики индикаторов (указателей). В ходе анализа учитываются требования, предъявляемые к бортовым системам контроля ЛА.

При анализе наземной системы контроля изучаются состав контролируемых параметров и аппаратуры, а также затраты труда, времени и средств на проведение контроля. В ходе анализа учитываются требования, предъявляемые к системам наземного контроля АТ.

Для оперативного управления контролепригодностью в ходе эксплуатации проводятся комплексные оценки свойств изделий. При этом используются данные о их типовых неисправностях и дефектах, методах, средствах и режимах диагностирования.

Различают качественную и количественную оценки контролепригодности.

Качественная оценка проводится путем сопоставления свойств объекта и систем его контроля с требованиями, приведенными в соответствующей нормативно-технической документации (табл. 1 и 2). Уровень контролепригодности объекта при этом устанавливается по числу (проценту) выполняемых требований, а также путем определения (подтверждения) категории (группы) его конструктивного исполнения.

Положительная оценка уровня контролепригодности дается в случае, если объект отвечает соответствующим требованиям не менее, чем на 90%, и подтверждается категория (группа) его конструктивного исполнения.

Исходные данные и результаты оценки сводятся в табл. 3.

Количественная оценка проводится с использованием ряда обобщенных и единичных показателей, которые характеризуют следящие свойства объекта. К обобщенным относятся показатели:

контролеспособности (полноты бортового контроля)  $K_n$  :

Т а б л и ц а 1

Категории (группы) конструктивного исполнения АТ  
по контролепригодности

№ п/п	Средства контроля	Работы по подготовке объекта к контролю	Способ сопряжения объекта с внешними средствами контроля	Степень унификации контролируемых параметров
1	Встроенные	Отсутствуют, кроме операций выключения и прогрева	Не регламентируется	Полностью унифицированы встроенными датчиками
2	Встроенные и внешние	Отсутствуют, кроме подключения внешних средств контроля	Бортовые разъемы для подключения внешних средств контроля	То же, но с добавлением внешних датчиков
3	Внешние	То же	То же	Полностью унифицированы внешними датчиками
4	Встроенные и внешние	То же, но со вскрытием лючков и панелей для подхода к точкам контроля	Контрольные точки вынесены на внешние поверхности	По группе 2
5	Внешние	То же	То же	По группе 3
6	Внешние	То же, но со снятием отдельных элементов конструкции, установкой технологических переходников, разрывом электрических или гидравлических цепей	—	Большая часть не унифицирована и не подлежит унификации стандартными датчиками

Т а б л и ц а 2

## Общие технические требования к контролепригодности ГТД

№ п/п	Содержание требований	Примечания
1.	Конструкция ГТД по контролепригодности должна соответствовать четвертой категории (группе) исполнения	
2.	Для контроля параметров режима ГТД должны измеряться:	

Продолжение табл. 2

№ п/п	Содержание требований	Примечания
	<p>частота вращения роторов;            температура газа;            расход топлива;            полное давление газа за турбиной;            полное давление воздуха на входе;            крутящий момент на валу винта;            температура торможения воздуха на входе</p>	<p>Только для ТРД            То же            Только для ТВД</p>
3.	<p>На ГТД должны быть установлены тахометрические преобразователи (датчики) для измерения частот вращения всех его роторов. На приборной доске должны быть установлены тахометры частот вращения каждого ротора</p>	<p>Погрешность не более <math>\pm 0,5\%</math></p>
4.	<p>Для измерения температуры газа за турбиной должно быть установлено не менее 8 преобразователей температуры. На приборной доске должны быть установлены индикаторы температуры газа</p>	<p>Погрешность не более <math>\pm 5^{\circ}\text{C}</math></p>
5.	<p>На ГТД с охлажденными рабочими лопатками турбины должен быть установлен фотоэлектрический пирометр для измерения температуры материала лопаток в критическом сечении</p>	<p>То же</p>
6.	<p>Для измерения расхода топлива на ГТД должен применяться преобразователь расхода, обеспечивающий возможность измерения массового расхода топлива (кг/час)</p>	<p>Погрешность не более <math>\pm 1\%</math></p>
7.	<p>Каждый ТРД (ТРДД) должен быть оснащен системой измерения тяги, для чего они должны быть оборудованы датчиками измерения полного (эквивалентного) давления газа за турбиной (и за вентилятором) и полного давления на входе. На приборной доске должен быть установлен указатель, показывающий отношение давлений на выходе и на входе ГТД (тягу)</p>	<p>Погрешность не более <math>\pm 2\%</math></p>

№ п/п	Содержание требований	Примечания
8.	Для всех ГТД должно обеспечиваться измерение температуры торможения воздуха на входе	Погрешность не более $\pm 2^{\circ}\text{C}$
9.	Каждый ГТД должен быть оборудован преобразователем, выдающим сигнал положения рычага управления двигателем (РУД)	
10.	Каждый ГТД должен быть оборудован преобразователями, используемыми для сигнализации критических значений параметров: минимального давления топлива; минимального давления масла; максимального уровня вибрации; появления стружки в масле; пожара двигателя; возникновения помпажа; обледенения на входе	
11.	Для проведения наземных проверок агрегатов на каждом ГТД должны быть предусмотрены устройства отбора информации (штуцера, электрические разъемы и т.д.) для подсоединения внешних средств контроля	
12.	Для контроля состояния масла на каждом ГТД должны применяться: бортовые сигнализаторы появления металлических частиц (стружки) в масле; магнитные пробки для улавливания ферромагнитных (стальных) частиц; сливные краны для отбора проб масла для проведения наземного анализа на содержание продуктов изнашивания	
13.	На каждом ГТД должны быть установлены преобразователи (датчики) вибрации, способные контролировать ее уровень во всем диапазоне частот вращения роторов	

№ п/п	Содержание требований	Примечания
14.	Для контроля подшипниковых узлов опор роторов на ГТД должны быть установлены широкополосные пьезопреобразователи вибрации	
15.	На каждом ГТД должна быть обеспечена возможность периодического контроля деталей проточной части с помощью специальных оптических, ультразвуковых и токовихревых приборов. Для ввода датчиков приборов в проточную часть должны быть предусмотрены отверстия (лочки, окна)	
16.	На всех ГТД должна быть предусмотрена возможность проведения рентгенографического контроля деталей проточной части с помощью радиоизотопного источника излучения, вводимого в полный вал ротора	
17.	<p>На всех ГТД должны быть обеспечены удобные подходы в эксплуатации ко всем точкам контроля, в том числе:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>окнам для контроля проточной части;</li> <li>магнитным пробкам;</li> <li>измерительным преобразователям (датчикам);</li> <li>штуцерам и эл.разъемам, предназначенным для контроля агрегатов;</li> <li>полому валу ротора для проведения рентгенографирования</li> </ul>	

$$K_{\Pi} = 1 - \frac{N_{HK}}{N_{HK} + N_{BK}}, \quad (1)$$

где  $N_{BK}$ ,  $N_{HK}$  - число параметров объекта, контролируемых средствами бортового и наземного контроля;

легкоконтрольности (трудоемкости наземного контроля)  $K_T$  :

$$K_T = 1 - \frac{T_{\text{осп}}}{T_{\text{осп}} + T_{\text{осн}}}, \quad (2)$$



где  $T_{осн}, T_{всп}$  — трудоемкости основных (диагностических) и вспомогательных (подготовительных) операций контроля, чел.-ч.

Т а б л и ц а 3

Исходные данные и результаты качественной оценки контролепригодности

(указать наименование объекта)

№ п/п	Содержание требований	Соответствие требованиям	Причины несоответствия требованиям
1			
2			
3			
и т.д.			

Заключение (дана оценка уровня контролепригодности объекта)

При необходимости наряду с указанными могут быть использованы другие обобщенные показатели.

К основным относятся показатели: утилизации устройств сопряжения  $K_{ус}$ , утилизации контролируемых параметров  $K_{уп}$ , использования специализированных средств контроля  $K_{ис}$  и другие. Методика расчета показателей подробно рассматривается в [1].

Проводятся дифференцированная и интегральная оценки уровня контролепригодности.

При дифференцированной оценке уровень контролепригодности объекта устанавливается с использованием ряда относительных показателей  $K_i$ :

$$K_i = \frac{K_i}{K_{i_{баз}}}, \quad (3)$$

где  $K_i, K_{i_{баз}}$  — соответственно расчетное и базовое (нормативное) значения  $i$ -го показателя.

При  $K_i \geq 1$  для всех анализируемых показателей дается положительная, а при  $K_i < 1$ , хотя бы для одного показателя, отрицательная оценка уровня контролепригодности объекта.

При интегральной оценке уровень контролепригодности объекта устанавливается с использованием относительного показателя  $K_{\Sigma}$ :

$$\bar{K}_{\Sigma} = \frac{K_{\Sigma}}{K_{\Sigma \text{ баз}}}, \quad (4)$$

где  $K_{\Sigma}$ ,  $K_{\Sigma \text{ баз}}$  - соответственно расчетное и базовое (нормативное) значения комплексного показателя контролепригодности.

Расчет показателя  $K_{\Sigma}$  ведется по формуле

$$K_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n K_i^{\alpha_i}, \quad (5)$$

где  $K_i$  - значение  $i$ -го показателя контролепригодности;

$\alpha_i$  - коэффициент значимости  $i$ -го показателя;

$n$  - число анализируемых показателей.

При  $\bar{K}_{\Sigma} > 1$  дается положительная, а при  $\bar{K}_{\Sigma} < 1$  - отрицательная оценка уровня контролепригодности объекта.

В качестве базовых (нормативных) значений показателей  $K_i \text{ баз}$  и  $K_{\Sigma \text{ баз}}$  принимаются соответствующие показатели лучших образцов отечественной и зарубежной АТ.

При расчете показателей  $K_i$  и  $K_{\Sigma}$  используются данные, полученные путем изучения методики диагностирования объекта и хронметража работ, связанных с проведением контроля.

Исходные данные для расчета показателей и результаты оценки контролепригодности сводятся в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Исходные данные и результаты количественной оценки контролепригодности

(указать наименование объекта)

№ п/п	Наименование показателей	Исходные данные для расчета показателей					Расчетные значения показателей						
		$N_{БК}$	$N_{НК}$	$T_{ос}$ цел.ч	$T_{вс}$ цел.ч	$\alpha_i$	$K_i$ баз	$K_n$	$K_T$	$K_{\Sigma}$	$\bar{K}_n$	$\bar{K}_T$	$\bar{K}_{\Sigma}$
1.	Контролеспособности												
2.	Легкоконтрольность												
3.	Комплексный												
Заключение (дать оценку уровня контролепригодности объекта)													

По результатам качественной и количественной оценок разрабатываются мероприятия, направленные на повышение контролепригодности объекта. Их можно условно разделить на конструктивные и технологические.

К типовым конструктивным мероприятиям относятся: доработки конструкции объекта в направлении снижения трудоемкости основных и вспомогательных операций контроля (обеспечение подходов к точкам контроля, легкосъемности и взаимозаменяемости контролируемых элементов и т.д.); оснащение объекта дополнительными встроенными датчиками, средствами сбора и обработки диагностической информации и другие.

К типовой технологическим (эксплуатационным) мероприятиям относятся: внедрение перспективных методов и средств контроля, автоматизация контроля, разработка оснастки и приспособлений, повышающих эффективность контроля, совершенствование метрологической службы предприятия, повышение квалификации операторов-контролеров и другие.

Наиболее высокой эффективностью отличаются решения, базирующиеся на комплексном использовании достижений технической диагностики и повышении контролепригодности АТ. Следует отметить, что планируемые мероприятия не должны оказывать отрицательное влияние на работоспособность объекта. Эффективность мероприятий оценивается по ожидаемым изменениям показателей контролепригодности или группы конструктивного исполнения объекта.

#### Пример анализа контролепригодности объекта

Методику анализа контролепригодности рассмотрим на примере двигателя НК-8-2У самолета Ту-154.

I. Исходные данные для проведения качественной оценки контролепригодности, полученные путем изучения конструкции и методики диагностирования двигателя, а также ее результаты сведен в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Исходные данные и результаты качественной оценки  
контролепригодности двигателя НК-8-2У

№ п/п	Содержание требований	Соответствие требованиям	Причины несоответствия требованиям
1.	Категория конструктивного исполнения	Соответствует	
2.	Перечень измеряемых параметров	То же	

№ п/п	Содержание требований	Соответствие требованиям	Причины несоответствия требованиям
3.	Наличие тахометров всех роторов	Соответствует	
4.	Наличие не менее 8 преобразователей температуры газов	Не соответствует	На двигателе установлены 4 преобразователя температуры
5.	Наличие расходомера топлива	Соответствует	
6.	Наличие измерителя тяги	Не соответствует	Система измерения тяги отсутствует
7.	Наличие измерителя температуры воздуха на входе в двигатель	Соответствует	
8.	Наличие указателя $\alpha_{ру}$	То же	
9.	Перечень сигнализируемых параметров	Не соответствует	Отсутствует датчик сигнализатор лампы компрессора
10.	Наличие сопряжений с наземной аппаратурой контроля	То же	Наземная система контроля отсутствует
11.	Наличие средств контроля качества масла	Соответствует	
12.	Наличие средств вибродиагностики двигателя	То же	
13.	Наличие средств вибродиагностики подшипников опор	Не соответствует	Отсутствует соответствующий вибропреобразователь
14.	Возможность рентгеноконтроля проточной части	То же	Отсутствует соответствующее конструктивное решение
15.	Возможность неразрушающего контроля элементов проточной части двигателя	Соответствует	
16.	Наличие подхода к точкам контроля	Не соответствует	Отсутствует подход к полюсу ротору для рентгеновского контроля

Заключение. Контролепригодность двигателя не соответствует ТУ, так как удовлетворяется 62,5% требований.

2. Исходные данные и результаты количественной оценки контролепригодности двигателя сведен в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

Исходные данные и результаты оценки контролепригодности двигателя НК-8-2У

№ п/п	Наименование показателей	Исходные данные для расчета показателей					Расчетные значения показателей						
		$N_{БК}$	$N_{НК}$	$T_{осн}$ цел.ч	$T_{всп}$ цел.ч	$\alpha_i$	$K_i$ балл	$K_n$	$K_T$	$K_\Sigma$	$\bar{K}_n$	$\bar{K}_T$	$\bar{K}_\Sigma$
1.	Контролеспособности	12	8	-	-	2	0,9	0,8			0,67		
2.	Легкоконтрольности			24	30	1	0,9		0,44			0,49	
3.	Комплексный						0,73			0,16			0,22
Заключение. Контролепригодность двигателя не соответствует ТУ по всем показателям.													

3. По результатам качественной и количественной оценок предлагается провести следующие мероприятия:

- оснастить двигатель системой измерения тяги в полете;
- установить датчик-сигнализатор помпажа компрессора;
- разработать систему наземного контроля двигателя и его агрегатов с установкой унифицированного разъема для ее подключения;
- внести в конструкцию роторов двигателя элементы, позволяющие проводить рентгеновский контроль прочной части.

Оценку эффективности предлагаемых мероприятий проведем по результатам к подконтрольной эксплуатации двигателя.

#### Порядок проведения занятия

1. Ознакомиться с устройством, работой и методикой диагностирования заданного объекта.
2. Подготовить исходные данные для проведения качественной и количественной оценок контролепригодности.
3. Провести качественную и количественную оценки и дать заключение об уровне контролепригодности объекта.
4. Предложить мероприятия, направленные на повышение контролепригодности объекта и дать оценку их эффективности.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ

Ц е л ь з а н я т и я - приобретение знаний студентами по теме курса, посвященной выбору режимов диагностирования объектов, и в частности, определение граничных значений диагностических параметров и показателей эффективности контроля с использованием метода статистических решений (метода минимального риска).

### Содержание занятия

1. Изучение метода определения граничных значений диагностических параметров и показателей эффективности контроля.
2. Определение граничного значения диагностического параметра и показателей эффективности контроля заданного объекта.

### Статистический метод определения граничных значений диагностических параметров

Техническое диагностирование (ТД) представляет собой процесс определения (распознавания) технического состояния (ТС) объекта по результатам его обследования. Итогом ТД является технический диагноз - заключение о ТС объекта на момент обследования (проверки) с отнесением его к одному из возможных классов (диагнозов), причем число диагнозов обычно заранее известно.

Распознавание ТС основывается на диагностических моделях, которые устанавливают взаимосвязь между возможными ТС (диагнозами) и их отображениями в пространстве диагностических признаков (параметров). При решении задач классификации ТС (годен-негоден) для диагностических параметров устанавливаются граничные значения, правила определения которых выбираются исходя из некоторых условий оптимальности, например, из условия минимального риска (минимальных затрат на эксплуатацию объекта) [2] .

Рассмотрим методику определения граничных значений диагностических параметров для случая, когда ТС объекта распознается по одному параметру  $X$  .

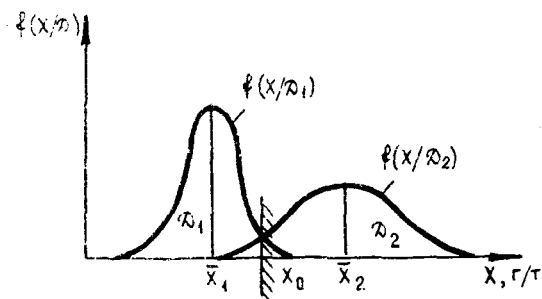
Задача состоит в выборе граничного (предельного) значения параметров  $X_0$  , при котором в случае  $X \geq X_0$  принимается решение о снятии объекта с эксплуатации, а в случае  $X < X_0$  - о его дальнейшем

использованы по назначению. Таким образом, по значению параметра  $X_0$  объекты разделяются на два класса (диагноза):  $D_1$  - исправные и  $D_2$  - неисправные (дефектные). Указанное правило решения задачи означает:

$$\begin{aligned} \text{при } X < X_0, & \quad X \in D_1, \\ \text{при } X \geq X_0, & \quad X \in D_2. \end{aligned} \quad (6)$$

В силу влияния различных факторов значение параметра  $X$  обычно неоднозначно определяет ТС объекта. В результате у исправного объекта значение параметра может оказаться выше, а у неисправного - ниже граничного значения.

Плотности вероятностей распределения параметра  $X$  для исправных  $f(X/D_1)$  и неисправных  $f(X/D_2)$  объектов представлены на рис. I.



Р и с. I. Плотности вероятностей распределения параметра  $X$  для исправных  $D_1$  и неисправных  $D_2$  объектов

Как видно из рисунка, области исправных  $D_1$  и неисправных  $D_2$  состояний пересекаются, поэтому невозможно указать значение  $X_0$ , при котором правило (I) не давало бы ошибочных решений. Задача состоит в том, чтобы выбор  $X_0$  был в некотором смысле оптимальным.

Возможными ошибками при принятии решения по результату ТД являются:

ложная тревога (ошибка I рода), когда исправный объект  $D_1$  ошибочно признается неисправным  $D_2$ ;

пропуск дефекта (ошибка II рода), когда неисправный объект  $D_2$  ошибочно признается исправным  $D_1$ .

Вероятности ложной тревоги  $P_{ЛТ}$  и пропуска дефектов  $P_{ПД}$  определяются из выражений:

$$P_{лт} = P(D_1) \cdot P(X > X_0 / D_1) = P_1 \int_{X_0}^{\infty} f(X/D_1); \quad (7)$$

$$P_{пг} = P(D_2) \cdot P(X < X_0 / D_2) = P_2 \int_{-\infty}^{X_0} f(X/D_2), \quad (8)$$

где  $P_1, P_2$  - вероятности состояний  $D_1$  и  $D_2$  (считаются известными по статистическим данным), причем  $P_2 = 1 - P_1$ .

Таким образом, ошибочное решение по результату ТД может быть принято с вероятностью  $P_{ош}$  :

$$P_{ош} = P_{лт} + P_{пг}. \quad (9)$$

Если в выражении (9) указать цены ошибок ( $C_{лт}$  - стоимость ложной тревоги,  $C_{пг}$  - стоимость пропуски дефекта), то получим выражение для определения риска  $R$  :

$$R = C_{лт} \cdot P_{лт} + C_{пг} \cdot P_{пг}. \quad (10)$$

В зависимости от поставленной задачи и имеющейся информации при определении  $X_0$  используются методы статистических решений (минимального риска, минимакса, наибольшего правдоподобия, Неймана-Пирсона и др.). На практике предпочтение обычно отдается методу минимального риска, который (при наличии необходимой информации) дает наиболее эффективные результаты расчетов.

Для использования данного метода необходимо установить: средние значения параметра для исправных  $\bar{X}_1$  и неисправных  $\bar{X}_2$  состояний объекта, средние квадратичные отклонения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , вероятности  $P_1$  и  $P_2$ , а также стоимости ошибок  $C_{лт}$  и  $C_{пг}$ .

Если указанные данные имеются, то значение  $X_0$  определяется из условия минимального риска ( $R = R_{min}$ ). Дифференцируя (10) с учетом (7) и (8) по  $X_0$  и приравняв производную к нулю, получим выражение для определения экстремума функции ( $R_{min}$ ):

$$\frac{dR}{dX_0} = C_{пг} \cdot P_2 \cdot f(X_0/D_2) - C_{лт} \cdot P_1 \cdot f(X_0/D_1) = 0,$$

откуда

$$\frac{f(X_0/D_1)}{f(X_0/D_2)} = \frac{C_{пг} \cdot P_2}{C_{лт} \cdot P_1} \quad (II)$$



В соответствии с (6) и (II) имеем

$$X \in D_1 \quad \text{при} \quad \frac{f(X_0/D_1)}{f(X_0/D_2)} > \frac{C_{\text{пг}} \cdot P_2}{C_{\text{лт}} \cdot P_1}; \quad (12)$$

$$X \in D_2 \quad \text{при} \quad \frac{f(X_0/D_1)}{f(X_0/D_2)} \leq \frac{C_{\text{пг}} \cdot P_2}{C_{\text{лт}} \cdot P_1}. \quad (13)$$

Параметр  $X$  обычно распределен по нормальному закону как у исправных, так и у дефектных объектов, поэтому

$$f(X_0/D_1) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X_0 - \bar{X}_1)^2}{2\sigma_1^2}}; \quad (14)$$

$$f(X_0/D_2) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X_0 - \bar{X}_2)^2}{2\sigma_2^2}}. \quad (15)$$

Подставив (14) в (II) и проведя преобразования, имеем

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_2}{\sigma_1} e^{-\frac{(X_0 - \bar{X}_1)^2}{2\sigma_1^2} + \frac{(X_0 - \bar{X}_2)^2}{2\sigma_2^2}} &= \frac{C_{\text{пг}} \cdot P_2}{C_{\text{лт}} \cdot P_1}; \\ e^{-\frac{(X_0 - \bar{X}_1)^2}{2} + \frac{(X_0 - \bar{X}_2)^2}{2}} &= \frac{\sigma_1 \cdot P_2 \cdot C_{\text{пг}}}{\sigma_2 \cdot P_1 \cdot C_{\text{лт}}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Проведя логарифмирование (16), получим выражение, удобное для расчета  $X_0$ :

$$-\frac{(X_0 - \bar{X}_1)^2}{2\sigma_1^2} + \frac{(X_0 - \bar{X}_2)^2}{2\sigma_2^2} = \ln \left( \frac{\sigma_1 \cdot P_2 \cdot C_{\text{пг}}}{\sigma_2 \cdot P_1 \cdot C_{\text{лт}}} \right). \quad (17)$$

С учетом значения  $X_0$  рассчитываются значения показателей эффективности контроля (минимальный риск  $R_{\text{мин}}$ , вероятность пропуска дефекта  $P_{\text{пг}}$  и вероятность ложной тревоги  $P_{\text{лт}}$ ). Учитывая нормальность распределения параметра  $X$  из (7) и (8), получим:

$$P_{\text{лт}} = P_1 \int_{X_0}^{\infty} f(X_0/D_1) dX_0 = P_1 [1 - \Phi^*(X_0/D_1)] = P_1 \left[ 1 - \Phi^* \left( \frac{X_0 - \bar{X}_1}{\sigma_1} \right) \right]; \quad (18)$$

$$P_{\text{пг}} = P_2 \int_{-\infty}^{\infty} f(X_0/D_1) dX_0 = P_2 \Phi^*(X_0/D_2) = P_2 \Phi^*\left(\frac{X_0 - \bar{X}_2}{\sigma_2}\right). \quad (19)$$

Из (10) с учетом (18) и (19) получим выражение для расчета  $R_{\text{min}}$ :

$$R_{\text{min}} = C_{\text{лт}} \cdot P_1 [1 - \Phi^*\left(\frac{X_0 - \bar{X}_1}{\sigma_1}\right)] + C_{\text{пг}} \cdot P_2 \Phi^*\left(\frac{X_0 - \bar{X}_2}{\sigma_2}\right), \quad (20)$$

где  $\Phi^*(\dots)$  - табличная функция [3].

### Пример определения граничного значения диагностического параметра

Диагностирование подшипников опор роторов ГТД обычно проводится по концентрации продуктов изнашивания (железа) в моторном масле (параметр  $X$ ). Требуется определить граничное значение концентрации железа  $X_0$  и соответствующие ему показатели эффективности контроля ( $R_{\text{min}}$ ,  $P_{\text{лт}}$ ,  $P_{\text{пг}}$ ).

Решение поставленной задачи проведем при следующих исходных данных:  $\bar{X}_1 = 0,53$  г/т,  $\sigma_1 = 0,11$  г/т,  $\bar{X}_2 = 0,92$  г/т,  $\sigma_2 = 0,14$  г/т,  $P_1 = 0,9$ ,  $P_2 = 0,1$ ,  $C_{\text{лт}} = 10000$  руб,  $C_{\text{пг}} = 130000$  руб.

1. Используя (17), определим предельно допустимое содержание железа в масле  $X_0$ :

$$\frac{(X_0 - 0,53)^2}{2 \cdot 0,11^2} + \frac{(X_0 - 0,92)^2}{2 \cdot 0,14^2} = \ln\left(\frac{0,11}{0,14} \cdot \frac{0,1}{0,9} \cdot \frac{130000}{100000}\right),$$

откуда

$$25X_0^2 - 7X_0 - 7,37 = 0;$$

$$X_{012} = 0,14 \pm 0,56;$$

$$X_{01} = 0,7; X_{02} = -0,32.$$

Параметр  $X$ , представляющий собой концентрацию железа в масле, не может иметь отрицательных значений, поэтому  $X_0 = X_{01} = 0,7$  г/т.

2. Используя (18), (19) и (20), определим  $P_{\text{лт}}$ ,  $P_{\text{пг}}$  и  $R_{\text{min}}$  для значения  $X_0 = 0,7$  г/т:

$$P_{\text{лт}} = 0,9 [1 - \Phi^*\left(\frac{0,7 - 0,53}{0,11}\right)] = 0,9 [1 - \Phi^*(1,54)] = 0,05;$$

$$P_{пг} = 0,1 \cdot \Phi^* \left( \frac{0,7 - 0,22}{0,14} \right) = 0,1 \cdot \Phi^* (-1,57) = 0,006;$$

$$P_{min} = 0,05 \cdot 10000 + 0,006 \cdot 130000 = 1280 \text{ руб.}$$

3. Анализ полученных результатов указывает на относительно низкие показатели эффективности контроля. Так, по результатам проверок из 100 исправных двигателей 5 будет ошибочно сниматься с эксплуата-ции, а 6 из 1000 дефектных двигателей – использоваться с развиваю-щейся неисправностью. Это, в конечном итоге, может привести к воз-никновению отказа и серьезным нарушениям конструкции. В результате каждая проверка (без учета положительного эффекта) будет иметь мате-риальный риск более 1280 рублей.

4. С целью повышения эффективности контроля двигателя целесооб-разно ввести дополнительные диагностические параметры (например, время высега роторов, уровень вибрации и т.д.), что позволит уменьшить вероятности ошибок, а следовательно, и величину ожидаемого риска.

#### Порядок проведения занятия

1. Ознакомиться с устройством и методикой диагностирования за-данного объекта.

2. Сформулировать задачу и подготовить исходные данные для рас-чета.

3. Определить граничное значение диагностического параметра и соответствующие ему значения показателей эффективности контроля.

4. Провести анализ полученных результатов и дать рекомендации по повышению эффективности контроля.

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ИЗДЕЛИЙ

Ц е л ь з а н я т и я - приобретение и закрепление знаний студентами по теме курса, посвященной выбору комплексных диагностических признаков и, в частности, ознакомление со статистическим методом распознавания технических состояний (ТС) изделий (методом Байеса).

Содержание занятия

1. Изучение метода распознавания ТС изделий.
2. Определение вероятностей различных диагнозов заданного объекта.

### Статистический метод распознавания ТС

Техническое диагностирование представляет собой процесс распознавания ТС объекта по результатам его обследования. Итогом ТД является технический диагноз - заключение о ТС объекта с указанием (при необходимости) места, вида и причины дефекта или развивавшейся неисправности. Распознавание ТС базируется на математических моделях, устанавливающих взаимосвязь между ТС объекта и их отображением в пространстве диагностических признаков (ДП). Сам процесс распознавания заключается в отнесении ТС объекта к одному из возможных классов (диагнозов), причем число диагнозов обычно заранее известно.

При разработке модели объект ТД представляется как динамическая система, ТС которой в каждый момент времени определяется значениями входных, внутренних и выходных параметров. При этом значения выходных (функциональных) параметров зависят от значений входных и внутренних (структурных) параметров. Наличие такой взаимосвязи между параметрами позволяет (при определенных условиях) использовать функциональные параметры в качестве ДП для распознавания ТС структурных элементов. Доступность функциональных параметров для наблюдения с использованием бортовой системы контроля существенно упрощает задачу ТД.

Следует отметить, что изделия авиационной техники (двигатели, функциональные системы, агрегаты и т.д.), как правило, относятся к сложным техническим устройствам, ТС которых характеризуются практически бесконечным числом параметров, а многовариантность их работы и

постоянное изменение условий эксплуатации приводят к бесконечному числу значений параметров. Кроме того, для них практически невозможно указать все возможные ТС и их ДП. В силу этого, при составлении диагностических моделей объектов устанавливается перечень наиболее вероятных (типовых) неисправностей (дефектов), а также внешних признаков (симптомов), сопровождающих их появление. Такая модель позволяет составить перечень агрегатов, узлов и деталей, подлежащих проверке, и выбрать комплекс диагностических признаков для распознавания их ТС.

Источником информации при этом служат карточки учета отказов и неисправностей, акты исследования досрочно снятых изделий, результаты контроля ДД при ТО и Р и т.д.

Ограниченные возможности бортовой системы контроля (наблюдается только некоторая часть функциональных параметров) приводит к тому, что на практике всегда приходится иметь дело с неполной информацией. Кроме того, наблюдаемые параметры (температура, обороты, давление и т.д.) не всегда однозначно связаны с величиной структурных параметров. В результате, возникающие ТС могут быть различимы только с некоторой вероятностью (точностью), причем чем лучше подобран комплекс ДП, тем выше точность диагноза.

При ТД по комплексу ДП широко используется статистический метод (метод Байеса). Постановка задачи при этом такова.

Имеется объект, который может находиться в одном из  $n$  случайных состояний  $D_i$ . Известен комплекс простых признаков  $\kappa^*$  ( $\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_j, \dots, \kappa_n$ ), каждый из которых с определенной вероятностью характеризует состояние объекта. Требуется по совокупности проявления  $\kappa_j$  или не-проявления  $\bar{\kappa}_j$  отдельных признаков отнести состояние объекта к одному из возможных классов (диагнозов).

Вероятность диагноза  $D_i$  при реализации комплекса  $\kappa^*$  определяется по формуле Байеса:

$$P(D_i / \kappa^*) = \frac{P(D_i) \cdot P(\kappa^* / D_i)}{\sum_{i=1}^n P(D_i) \cdot P(\kappa^* / D_i)}, \quad (21)$$

где  $P(D_i / \kappa^*)$  - вероятность диагноза  $D_i$  при наблюдении комплекса  $\kappa^*$ ;

$P(D_i)$  - вероятность состояния  $D_i$  (определяется по статистическим данным);

$P(\kappa^* / D_i)$  - априорная вероятность появления комплекса  $\kappa^*$  при возникновении состояния  $D_i$ ;

$n$  - число различаемых состояний объекта, причем

$$\sum_{i=1}^n P(D_i) = 1;$$

$P(K^*/D_i)$  - вероятность появления комплекса  $K^*$  при различных состояниях объекта.

При решении большинства практических задач ДП считаются независимыми, т.е. имеет место зависимость

$$P(K^*/D_i) = P(K_1/D_i) \cdot P(K_2/D_i) \dots P(K_j/D_i).$$

В случае двуразрядных ДП ( $K_j, \bar{K}_j$ ) обычно ограничиваются определением вероятности их появления  $P(K_j/D_i)$ , так как

$$P(\bar{K}_j/D_i) = 1 - P(K_j/D_i).$$

При постановке окончательного диагноза следует придерживаться правила: объект с комплексом признаков  $K^*$  относится к диагнозу  $D_i$  по наибольшей вероятности  $P(D_i/K^*)$ , т.е.

$$D_i \in K^* \text{ при } P(D_i/K^*) = \max.$$

Для проведения расчетов составляется диагностическая матрица (табл. 7), в которую сводятся необходимые исходные данные.

Т а б л и ц а 7

Диагностическая матрица  
(указать наименование объекта)

Состояния (диагнозы)	Вероятности появления ДП				Вероятности состояния (диагнозов)
	$K_1$	$K_2$		$K_j$	
$D_1$	$P(K_1/D_1)$	$P(K_2/D_1)$		$P(K_j/D_1)$	$P(D_1)$
$D_2$	$P(K_1/D_2)$	$P(K_2/D_2)$		$P(K_j/D_2)$	$P(D_2)$
.					
.					
.					
$D_n$	$P(K_1/D_n)$	$P(K_2/D_n)$		$P(K_j/D_n)$	$P(D_n)$

### Пример распознавания ТС изделий

В качестве примера рассмотрим методику распознавания ТС газотурбинного двигателя по двум ДП:  $K_1$  – повышение температуры газов за турбиной более чем на  $50^\circ\text{C}$  и  $K_2$  – увеличение времени выхода на взлетный режим (максимальные обороты) более чем на 5 с. Появление данных ДП связывается с неисправностью топливного регулятора  $D_1$ , а также с увеличением радиальных зазоров в турбине  $D_2$ . При нормальном состоянии двигателя  $D_3$  признак  $K_1$  не наблюдается, а признак  $K_2$  наблюдается в 50% случаев. В состоянии  $D_1$  признак  $K_1$  встречается в 20%, а признак  $K_2$  – в 30% случаев. В состоянии  $D_2$  признак  $K_1$  встречается в 40%, а признак  $K_2$  – в 50% случаев. Известно, что 80% двигателей вырабатывает ресурс в нормальном состоянии  $D_3$ , у 5% двигателей возникает состояние  $D_1$ , а у 15% – состояние  $D_2$ . Требуется рассчитать вероятности диагнозов двигателя при различных сочетаниях ДП.

1. Исходные данные сведем в табл. 8.

Т а б л и ц а 8

Диагностическая матрица двигателя

Состояния (диагнозы)	Вероятности появления ДП				Вероятности состояний (диагнозов)
	$K_1$	$\bar{K}_1$	$K_2$	$\bar{K}_2$	
$D_1$	0,2	0,8	0,3	0,7	0,05
$D_2$	0,4	0,6	0,5	0,5	0,15
$D_3$	0	1,0	0,05	0,95	0,80

2. Используя (21) определим вероятности различных состояний (диагнозов) двигателя.

#### Случай первый

Признаки  $K_1$  и  $K_2$  проявились

$$P(D_1/K_1, K_2) = \frac{0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,3}{0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,3 + 0,15 \cdot 0,4 \cdot 0,5 + 0,8 \cdot 0,05 \cdot 0} = 0,09.$$

Аналогично получим:  $P(D_2/K_1, K_2) = 0,91$ ;  $P(D_3/K_1, K_2) = 0$ .

#### Случай второй

Признак  $\bar{K}_1$  отсутствует, а признак  $K_2$  проявился.

$$P(D_1/\bar{K}_1, K_2) = \frac{0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,3}{0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,3 + 0,15 \cdot 0,6 \cdot 0,5 + 0,8 \cdot 1 \cdot 0,05} = 0,12.$$

Аналогично получим:  $P(D_2/\bar{K}_1, K_2) = 0,4$ ;  $P(D_3/\bar{K}_1, K_2) = 0,48$

Случай третий

Признак  $K_1$  проявился, а признак  $\bar{K}_2$  отсутствует.

$$P(D_1/K_1, \bar{K}_2) = \frac{0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,7}{0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,7 + 0,15 \cdot 0,4 \cdot 0,5 + 0,8 \cdot 0,95 \cdot 1} = 0,19.$$

Аналогично получим:  $P(D_2/K_1, \bar{K}_2) = 0,81$ ;  $P(D_3/K_1, \bar{K}_2) = 0$ .

Случай четвертый

Признаки  $K_1$  и  $\bar{K}_2$  отсутствуют.

$$P(D_1/\bar{K}_1, \bar{K}_2) = \frac{0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,7}{0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,7 + 0,15 \cdot 0,6 \cdot 0,5 + 0,8 \cdot 0,95 \cdot 1} = 0,03.$$

Аналогично получим:  $P(D_2/\bar{K}_1, \bar{K}_2) = 0,05$ ;  $P(D_3/\bar{K}_1, \bar{K}_2) = 0,92$ .

3. Сведем результаты расчетов в табл. 9.

Т а б л и ц а 9

Вероятности диагнозов двигателя

$D_i$	$P(D_i/K_1, K_2)$	$P(D_i/\bar{K}_1, K_2)$	$P(D_i/K_1, \bar{K}_2)$	$P(D_i/\bar{K}_1, \bar{K}_2)$
$D_1$	0,09	0,12	0,19	0,03
$D_2$	0,91	0,40	0,81	0,05
$D_3$	0	0,48	0	0,92

4. Анализ полученных результатов позволяет установить, что при проявлении обоих ДП в двигателе имеет место увеличение радиальных зазоров в турбине, при отсутствии обоих ДП - нормальное состояние, при проявлении первого и отсутствии второго ДП - увеличение зазоров в турбине, при отсутствии первого и проявлении второго ДП - увеличение зазоров.

Неисправность топливного регулятора  $D_1$  данной совокупности ДП однозначно не распознается, поэтому необходимо ввести дополнительное обслуживание двигателя, например, путем измерения скольжения роторов.

Порядок проведения занятия

1. Ознакомиться с устройством и методикой диагностирования заданного объекта.

2. Сформулировать задачу и подготовить исходные данные для расчетов.

3. Рассчитать вероятности диагнозов объекта для различных совокупностей ДП.

4. Провести анализ полученных результатов и дать рекомендации по совершенствованию методики диагностирования объекта.



## ПОИСК НЕИСПРАВНОСТЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЛА

Ц е л ь з а к л я т я — приобретение и закрепление знаний студентами по теме курса, посвященной диагностированию функциональных систем ЛА и, в частности, изучению методов составления алгоритмов поиска неисправностей; ознакомлению с методикой сбора и обработки диагностической информации; приобретению навыков в выборе диагностических признаков (параметров) и построении алгоритмов поиска неисправностей.

### Содержание занятия

1. Ознакомление с методами составления алгоритмов поиска неисправностей функциональных систем.
2. Составление алгоритма поиска неисправностей заданной системы.

### Методы составления алгоритмов поиска неисправностей функциональных систем

Поиск неисправностей функциональных систем является важной составной частью работ, выполняемых при техническом обслуживании и ремонте ЛА. Целью поиска обычно является выявление (локализация) отказавших элементов, приведших к нарушению нормального функционирования (исправности) системы. Поиск неисправностей осуществляется путем индивидуальной или групповой проверки параметров элементов, входящих в состав системы.

Эффективность поиска, определяемая числом проверок, временем, трудоемкостью или стоимостью работ, во многом зависит от совершенства алгоритма поиска.

Конечной задачей, решаемой при составлении алгоритма поиска, является выбор оптимальных (с точки зрения принятого критерия) состава и последовательности проверок. Следует отметить, что универсального критерия, пригодного для различных условий поиска, не существует. Поэтому на практике используется ряд критериев и соответствующий

щих им алгоритмов поиска, различающихся как по составу и очередности проверок, так и по характеру используемой диагностической информации.

Применительно к объектам, составные части которых не имеют функциональных связей (неработающие системы), обычно проводятся индивидуальные проверки элементов. При этом используются алгоритмы поиска, составленные по принципу "проверка слабых точек", "возрастающая трудоемкость" или "трудоемкость-вероятность" [1].

Применительно к объектам, составные части которых функционально взаимосвязаны (работающие системы), возможны групповые проверки элементов. Алгоритмы поиска при этом составляются с использованием метода "средних точек". Сущность данного метода заключается в последовательном разбиении системы на участки, один из которых подвергается проверке. Разбиение системы прекращается, когда при очередной проверке будет выявлен отказавший элемент (неисправность).

В зависимости от принятого критерия и имеющейся диагностической информации выбирается наиболее рациональный принцип разбиения системы на участки. На практике используются следующие принципы разбиения.

Принцип "половинного разбиения" обычно используется для простейших систем при отсутствии диагностической информации или при равных вероятностях возникновения отказов  $P_i$  и трудоемкостях проверок  $T(P_j)$ .

При этом система каждый раз разбивается на два участка (рис.2), содержащих примерно одинаковое число элементов, один из которых проверяется. Для определения необходимого числа шагов разбиения (проверок)  $K(N)$  система, содержащая  $N$  элементов, представляется в виде:

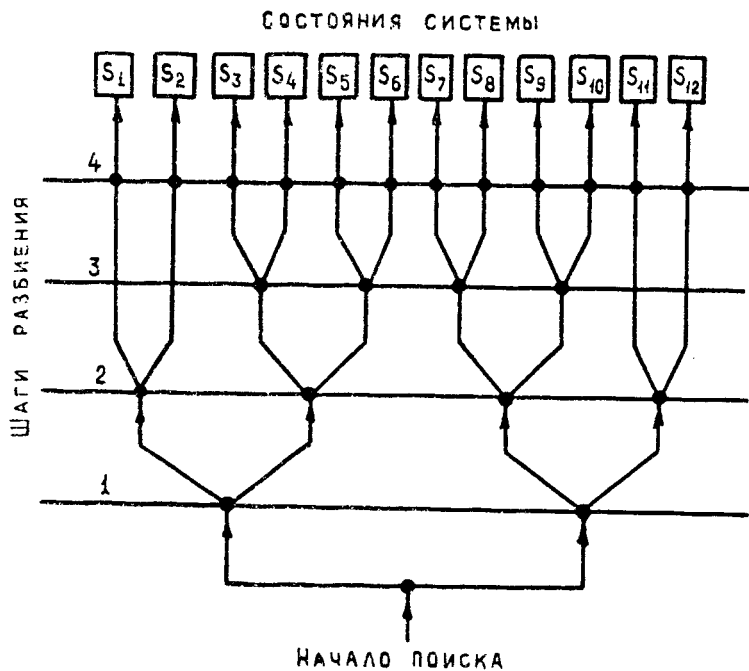
$$N = 2^m + R,$$

где  $R$  - число элементов сверхполной степени числа 2;

$m$  - целое положительное число.

В случае  $R = 0$  число разбиения составит  $K(N) = m$ , а в случае  $R \geq 1$   $K(N) = m + 1$ .

Принцип "равных вероятностей" позволяет уменьшить число проверок, необходимых для поиска неисправности за счет учета вероятностей возникновения отказов  $P_i$ .



Р и с. 2. Схема поиска неисправностей путем разбиения системы на участки

При этом на каждом шаге разбиения стремятся к равенству сумм вероятностей отказов элементов, входящих в состав образующихся участков, т.е. к выполнению условия

$$\sum_{i=1}^n P_i \approx \sum_{i=n+1}^N P_i ,$$

где  $n$  — число элементов, входящих в состав участка.

Принцип "минимальной трудоемкости" позволяет уменьшить трудоемкость (время) поиска за счет учета вероятностей возникновения отказов  $P(\Pi_j)$  и трудоемкостей проверок  $T(\Pi_j)$ . При выборе очередной проверки рассчитываются значения показателя  $E(\Pi_j) = H(\Pi_j) / T(\Pi_j)$  для образующихся участков системы. Проверке подвергается тот участок, у которого  $E(\Pi_j)$  имеет большее значение.

Принцип "максимума информации" обычно используется для сложных многофункциональных систем, когда имеется возможность определить их энтропию. Энтропия (неопределенность состояния) системы  $H(N)$ , состоящей из  $N$  элементов с вероятностями отказов  $P_i$ , определяется по формуле

$$H(N) = - \sum_{i=1}^N P_i \log_2 P_i \text{ (бит)},$$

а в случае равных вероятностей отказов  $P_i = \frac{1}{N}$  определяется по формуле

$$H(N) = \log_2 N. \quad (22)$$

Каждая проверка  $\Pi_j$  несет некоторое количество информации  $J(\Pi_j)$  о состоянии системы, в силу чего ее энтропия уменьшается. Очевидно, что для распознавания состояния системы необходимо условие

$$\sum_{j=1}^{K(N)} J(\Pi_j) = H(N). \quad (23)$$

Если при проверке  $\Pi_j$  одновременно проверяется  $n$  элементов системы, сумма вероятностей отказов которых  $P(\Pi_j) = \sum_{i=1}^n P_i$ , то количество получаемой информации  $J(\Pi_j)$  составит

$$J(\Pi_j) = - \left\{ P(\Pi_j) \log_2 P(\Pi_j) + [1 - P(\Pi_j)] \log_2 [1 - P(\Pi_j)] \right\}. \quad (24)$$

Поиск неисправности системы начинает с проверки, несущей максимум информации о ее состоянии. Проверка разбивает элементы (состояния) системы на две группы: на которые она реагирует "1" и не реагирует "0". Очередная проверка выбирается по максимуму информации для образующихся подгрупп элементов (состояний) и т.д.

Принцип "минимальной трудоемкости получения информации" позволяет снизить трудоемкость (время) поиска в условиях значительного числа элементов (состояний) и измеряемых параметров. Предпочтение отдается проверке, имеющей большее значение показателя

$$\epsilon(\pi_j) = \frac{\sum(S_i)}{T(\pi_j)}$$

Итерационно, необходимым для разработки алгоритмов поиска, получаем из диагностической матрицы (табл. 10), составленной на основе данных эксплуатации о возникающих неисправностях, и анализа функционирования системы.

Т а б л и ц а 10

Диагностическая матрица системы

Состояния системы, $S_i$	Проверяемые параметры (проверки), $\pi_j$					Вероятности состояний, $P_i$
	$\pi_1$	$\pi_2$	$\pi_3$	и т.д.		
$S_1$	0	0	0			
$S_2$	I	0	0			
$S_3$	I	I	0			
и т.д.						
$\sum(\pi_j)$						
$\epsilon(\pi_j)$						

Число строк в матрице соответствует числу различных состояний (элементов) системы, а число столбцов - числу проверок. Таким образом, каждая строка содержит совокупность результатов всех проверок

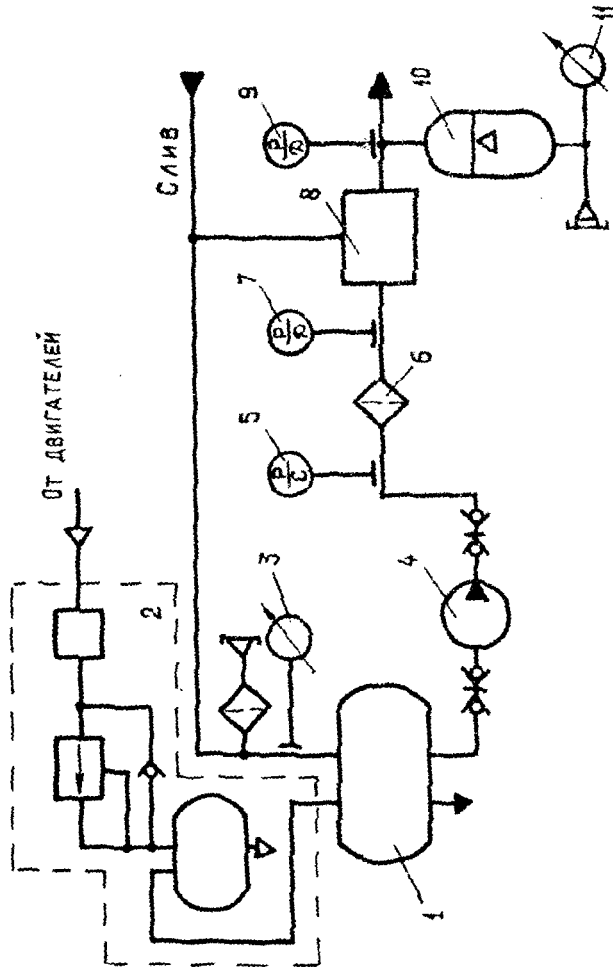
$S_i$  элемента, а каждая столбец - совокупность результатов  $\pi_j$  проверки всех элементов системы.

#### Пример составления алгоритма поиска

В качестве примера рассмотрим основной контур (источники давления) гидравлической системы самолета (рис. 3).

#### 1. Анализ функционирования системы

Воздух для нагнетания в насос 1 поступает из системы подкачивания 2, состоящей из дросселя, обратного клапана, предохранительного клапана и дренажного бачка. Масло из бака под давлением  $P_{\text{д}}$  поступает в насос 4, ступня под давлением  $P_{\text{мас макс}}$  идет через обратный клапан и фильтр 6 в автомат 6 разгрузки г/насоса (АРН). Из АРН масло под



Р и с. 3. Принципиальная схема источника давления гидросистем ДА: 1 - гидробак; 2 - система надува бака; 3 - манометр надува надува; 4 - насос высокого давления; 5 - сигнализатор давления; 6 - манометр; 7 - манометр давления; 8 - манометр загрузки насоса (АЧ); 9 - манометр надува в гидросистеме; 10 - гидроаккумулятор; 11 - манометр надува в гидроаккумуляторе

давлением  $P_{APN \max}$  идет на зарядку г/аккумулятора общей сети IO и далее к потребителям самолета. Контроль работы системы осуществляется по манометрам 3, 5, 7, 9 и 11.

Неисправность системы подкачивания проявляется в отсутствии давления наддува блага  $P_{\sigma}$  и связывается с отказом одного из входящих в ее состав агрегатов.

Неисправность насоса проявляется в снижении давления в системе  $P_{нас \max}$  и связывается с повышенным износом (отказом) плунжерных пар качающего узла.

Неисправность АРН проявляется в изменении пределов включения и выключения насоса  $P_{APN \max}, P_{APN \min}$  и связывается с износом (отказом) золотниковых пар.

Неисправность фильтра проявляется в падении давления за фильтром (РФ) при включении потребителей и связывается с засорением (отказом) фильтрующего элемента.

Неисправность г/аккумулятора проявляется в частном срабатывании АРН и связывается с падением давления азота  $P_{Oz}$  в его газовой полости.

## 2. Составление диагностической матрицы, минимизация числа измеряемых параметров

Исходя из данных эксплуатации, выделим следующие неисправности системы:

- $S_1$  - отказ системы подкачивания;
- $S_2$  - отказ г/насоса;
- $S_3$  - отказ г/фильтра;
- $S_4$  - отказ АРН;
- $S_5$  - отказ г/аккумулятора.

Исходя из условия обеспечения полного информативности, выбираем следующие измеряемые параметры (проверки):

- $P_1$  - давление наддува г/блага,  $P_{\sigma}$  ;
- $P_2$  - давление за насосом на рабочем режиме,  $P_{нас \max}$  ;
- $P_3$  - давление за насосом на холостом режиме,  $P_{нас \min}$  ;
- $P_4$  - обороты насоса,  $n_{нас \max}$  ;
- $P_5$  - давление за фильтром,  $P_{\phi}$  ;
- $P_6$  - давление аз АРН в линии зарядки г/аккумулятора на рабочем режиме,  $P_{APN \max}$  ;
- $P_7$  - давление аз АРН в линии зарядки г/аккумулятора на холостом режиме,  $P_{APN \min}$  ;

- $\Pi_8$  - давление за АРН в обратной линии на рабочем режиме,  $P_{АРН\ max}$ ;  
 $\Pi_9$  - давление за АРН в обратной линии на холостом режиме,  $P_{АРН\ хол}$  ;  
 $\Pi_{10}$  - расход масла за АРН в обратной линии на рабочем режиме,  $G_{АРН\ max}$  ;  
 $\Pi_{11}$  - расход масла на АРН в обратной линии на холостом режиме,  $G_{АРН\ хол}$  ;  
 $\Pi_{12}$  - давление азота в газовой полости г/аккумулятора,  $P_{гз}$  .

С учетом выделенных состояний (неисправностей) и проверяемых параметров составляем диагностическую матрицу системы (матрица I).

### МАТРИЦА I

Состояния системы, $S_i$	Проверяемые параметры, $\Pi_j$											
	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$\Pi_3$	$\Pi_4$	$\Pi_5$	$\Pi_6$	$\Pi_7$	$\Pi_8$	$\Pi_9$	$\Pi_{10}$	$\Pi_{11}$	$\Pi_{12}$
$S_1$	I	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$S_2$	0	I	0	I	I	I	0	0	0	0	I	0
$S_3$	0	0	0	0	I	I	0	0	0	0	I	0
$S_4$	0	I	I	0	I	I	I	I	I	I	I	0
$S_5$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	I
$J(\Pi_j)$	0,72	0,97	-	0,72	-	0,97	0,72	-	-	-	-	0,72

Для упрощения расчетов принимаем, что все выделенные состояния равновероятны и несовместны, параметры дают сигналы "норма" ("0") или "не норма" ("I"), проверке подвергается неисправная система.

Минимизацию измеряемых параметров (проверок) проведем с учетом наличия в матрице двух и более одинаковых столбцов. Из параметров, несущих одинаковое количество информации, составляем один, наиболее удобный для проверки, а остальные исключаем. Параметры, реализуемые на все состояния системы, из рассмотрения также исключаем, так как для поиска неисправностей они не несут дополнительной информации.

При составлении алгоритма поиска в силу сложности системы воспользуемся принципом "максимум информации". Расчет количества получаемой информации для каждого параметра матрицы I согласно (20) и (24) проведем по формуле

$$J(\Pi_j) = -\left(\frac{m}{n} \log_2 \frac{m}{n} + \frac{n}{N} \log_2 \frac{n}{N}\right); \quad (25)$$



где  $m$  - число результатов "I";  
 $n$  - число результатов "0";  
 $N$  - число выделенных состояний системы.

Так, например, параметр  $\Pi_2$  несет информацию

$$I(\Pi_2) = -\left(\frac{2}{5} \log_2 \frac{2}{5} + \frac{3}{5} \log_2 \frac{3}{5}\right) = 0,97.$$

При рассмотрении матрицы I видно, что наибольшее количество информации несут параметры  $\Pi_2$  и  $\Pi_6$ . Исходя из удобства замера, в качестве первой проверки выбираем параметр  $\Pi_2$ .

Относительно параметра  $\Pi_2$  матрицу I перестраиваем в матрицу 2, состоящую из двух подматриц:  $\mathcal{L}_1$ , включающую состояния  $S_2$  и  $S_4$ , из которых параметр  $\Pi_2$  реагирует, и  $\mathcal{L}_2$ , включающую состояния  $S_1, S_3$  и  $S_5$ , на которые он не реагирует.

МАТРИЦА 2

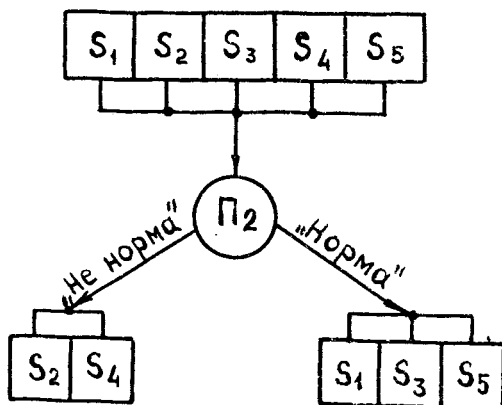
Состояния системы, $S_i$	Проверяемые параметры, $\Pi_j$					
	$\Pi_2$	$\Pi_1$	$\Pi_4$	$\Pi_6$	$\Pi_7$	$\Pi_{12}$
$\mathcal{L}_1 \begin{cases} S_2 \\ S_4 \end{cases}$	I	0	I	I	0	0
	I	0	0	I	I	0
$\mathcal{L}_2 \begin{cases} S_1 \\ S_3 \\ S_5 \end{cases}$	0	I	0	0	0	0
	0	0	0	I	0	0
	0	0	0	0	0	I
$I(\Pi_j)$	-	0,55	0,4	0,55	0,4	0,55

Если при проверке параметр  $\Pi_2$  окажется "в норме", то отказавший элемент следует искать в состояниях  $S_1, S_3$  или  $S_5$ , а если "не в норме" - в состояниях  $S_2$  или  $S_4$  (рис. 4).

Расчет количества получаемой информации для параметров матрицы 2 проведем по формуле:

$$I(\Pi_j) = -\sum_{i=1}^L \frac{\mathcal{L}_i}{N} \left( \frac{m_i}{m_i+n_i} \log_2 \frac{m_i}{m_i+n_i} + \frac{n_i}{m_i+n_i} \log_2 \frac{n_i}{m_i+n_i} \right), \quad (26)$$

где  $L$  - число подматриц;  
 $\mathcal{L}_i$  - число состояний в подматрице;  
 $N$  - число состояний в матрице;



Р и с. 4. Фрагмент алгоритма поиска неискренности

$m_i$  - число результатов "I" в подматрице;

$n_i$  - число результатов "0" в подматрице.

Так, например, параметр  $\Pi_6$  несет информацию

$$J(\Pi_6) = -\left[ \frac{2}{5} \left( \frac{2}{2} \log_2 \frac{2}{2} \right) + \frac{3}{5} \left( \frac{1}{3} \log_2 \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \log_2 \frac{2}{3} \right) \right] = 0,55.$$

В матрице 2 наибольшее количество информации несут параметры  $\Pi_1, \Pi_6, \Pi_{12}$ . Исходя из удобства замера, в качестве очередной проверки выбираем параметр  $\Pi_6$ . Относительно параметра  $\Pi_6$  матрицу 2 перестраиваем в матрицу 3, состоящую из трех подматриц ( $\ell_1, \ell_2$  и  $\ell_3$ ). Расчет количества получаемой информации проведем по (26).

### МАТРИЦА 3

Состояния системы, $S_i$	Проверяемые параметры, $\Pi_j$				
	$\Pi_6$	$\Pi_1$	$\Pi_4$	$\Pi_7$	$\Pi_{12}$
$\ell_1 \begin{cases} S_2 \\ S_4 \end{cases}$	I I	0 0	I 0	0 I	0 0
$\ell_2 \begin{cases} S_3 \\ S_1 \end{cases}$	I 0	0 I	0 0	0 0	0 0
$\ell_3 \begin{cases} S_1 \\ S_5 \end{cases}$	0 0	0 0	0 0	0 0	I I
$J(\Pi_j)$	-	0,4	0,4	0,4	0,4

В матрице 3 осталось четыре параметра, несущих равную информацию о состоянии системы. Исходя из удобства замера, в качестве очередной проверки выбираем параметр  $\Pi_7$ .

Относительно параметра  $\Pi_7$  матрицу 3 перестраиваем в матрицу 4, в которой остается три параметра. Согласно (26) рассчитаем количество получаемой информации.

МАТРИЦА 4

Состояния системы, $S_i$	Проверяемые параметры, $\Pi_j$			
	$\Pi_7$	$\Pi_1$	$\Pi_4$	$\Pi_{12}$
$e_1 \{S_2\}$	0	0	I	0
$e_2 \{S_4\}$	I	0	0	0
$e_3 \{S_1, S_5\}$	0	I	0	0
	0	0	0	I
$\mathcal{I}(\Pi_j)$	-	0,4	0,4	0,4

Исходя из удобства замера, в качестве очередной проверки выбираем параметр  $\Pi_{12}$ . Относительно параметра  $\Pi_{12}$  матрицу 4 перестраиваем в матрицу 5, содержащую два параметра.

МАТРИЦА 5

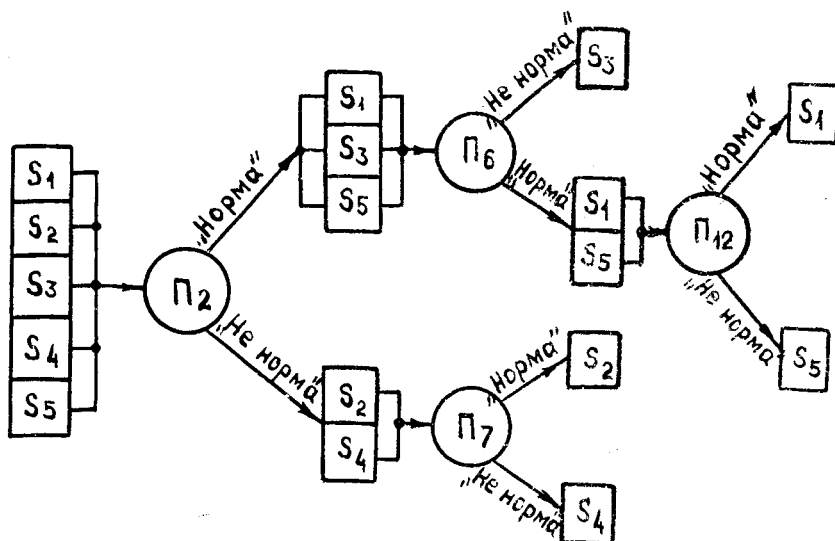
Состояния системы, $S_i$	Проверяемые параметры, $\Pi_j$		
	$\Pi_{12}$	$\Pi_1$	$\Pi_4$
$S_1$	0	I	0
$S_5$	I	0	0
$\mathcal{I}(\Pi_j)$	-	-	-

Если при проверке  $\Pi_{12}$  параметр окажется "в норме", то имеет место состояние  $S_5$ , а если "не в норме" - состояние  $S_1$ .

Таким образом, для определения состояния системы необходимо провести четыре проверки в очередности  $\Pi_2 - \Pi_6 - \Pi_7 - \Pi_{12}$ . Это положение можно доказать математически.

Энтропия системы, которая может находиться в пяти равновероятных состояниях, согласно (22) составляет

$$H(5) = \log_2 5 = 2,32.$$



Р и с. 5. Алгоритм поиска неисправностей гидросистемы

Информация, содержащаяся в четырех проверках, составляет

$$J(4) = 0,97 + 0,55 + 0,4 + 0,4 = 2,32.$$

Таким образом,  $J(4) = H(S)$ , что говорит о выполнении условия (23), т.е. о достаточности получаемой информации для однозначного определения состояния системы (локализации неисправности).

### 3. Составление алгоритма поиска неисправностей

На основе матриц 1, 2, 3, 4 и 5 составляем алгоритмы поиска неисправностей системы. Алгоритм представим в виде ориентированного графа (рис. 5).

#### Порядок проведения занятия

1. Ознакомиться с устройством, работой и типовыми неисправностями заданного объекта.

2. Составить диагностическую матрицу, провести минимизацию числа измеряемых параметров (проверок).

3. Определить состав и очередность проверок.
4. Составить алгоритм поиска.

#### Библиографический список

1. Техническая эксплуатация летательных аппаратов: Учебник для вузов / Под ред. Н.Н.Смирнова. М.: Транспорт, 1990. 423 с.
2. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978.
3. Венцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.

## СОДЕРЖАНИЕ

Анализ контролепригодности авиационной техники.....	3
Определение граничных значений диагностических параметров изделий.....	14
Статистический метод распознавания технических состояний изделий.....	20
Поиск неисправностей функциональных систем ЛА.....	25
Библиографический список.....	37

Макаровский Игорь Метиславович

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ  
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Редактор Н.С.Куприянова  
Техн.редактор Г.А.Ушачева  
Корректор Н.С.Куприянова

Написано в печать 15.09.94. Формат 60x64<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Папье офсетная. Бумага офсетная.  
Усл.печ. л. 2,1. Усл.кр.-отт. 2,2. Уч.-изд.л. 2,0.  
Тираж 100 экз. Заказ 355 Арт. С-109р/94.

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П.Королева.  
443086. Самара, Ульяновская улица, 18.

---

ИЗД. Самарского государственного аэрокосмического  
университета имени академика С.П.Королева.

143001. Самара, ул. Ульяновская, 18.