

Вводные замечания

Одной из основных задач технической диагностики является распознавание состояний объектов (систем) по комплексу проявляемых признаков.

Под термином "распознавание" понимается присвоение объекту статуса конкретного состояния. Это делается на основании так называемого *классификационного отбора*, где факт установления вида состояния заключается в отнесении объекта к одному из возможных (заранее известных) классов (состояний, диагнозов). Если количество возможных состояний достаточно большое, сделать классификационный отбор непросто, т.к. события, связанные с проявлением признаков и состояний, связаны между собой не функционально, а корреляционно, т.е. характеризуются вероятностными взаимосвязями.

Математический аппарат решения классификационных задач базируется на обработке данных априорной статистической информации, отражающей связь системы признаков и системы состояний. Эти данные формируются в результате наблюдений за парком ЛА и АД. Априорная связь признаков и состояний оценивается вероятностными показателями.

В то же время практика показывает, что диагноз, сформированный на реализации лишь одного признака, недостоверен, т.к. одни и те же диагностические признаки могут проявляться при совершенно различных состояниях (например, повышенная вибрация ГТД может наблюдаться при наступлении предотказных состояний подшипников, а также при обрыве одной из лопаток, появлении трещины на дисках турбокомпрессора и т.п.).

В ходе лекционных занятий отмечалось, что количество информации, приносимое каждым признаком в отношении конкретного состояния объекта (системы), может быть разным. Таким образом, для постановки правильного диагноза необходим комплексный подход, а формирование комплекса приоритетных признаков необходимо производить с учетом их информативности (содержательности приносимой признаками информации о состоянии объекта).

Первая лабораторная работа преследует цель укрепить понятие информативности (диагностического веса) каждого из конкурирующих признаков на основе предлагаемых количественных оценок, а также сформировать навыки выбора признаков, приоритетных в отношении конкретных состояний объектов АТ.

Вторая лабораторная работа посвящена определению количественных взаимосвязей между комбинациями диагностических признаков и возможным состоянием объекта АТ по методу Байеса (диагностирование по комплексу одномоментно проявляемых признаков).

Лабораторная работа № 1

Оценка информативности диагностических признаков и их выбор

1. Цели работы

1. Усвоение и закрепление знаний по программе лекционного курса «Техническая диагностика».
2. Формирование навыков оценки и выбора диагностических признаков, обладающих максимальной информативностью.
3. Усвоение принципов формирования диагностических решений на основе полученных результатов.

2. Порядок проведения работы

1. Анализ ГТД как объекта диагностирования.
2. Формирование перечня конкурирующих признаков, которые могут быть использованы для оценки состояния ГТД.
3. Выбор признаков, обладающих наибольшей информативностью (диагностической ценностью). Формирование рекомендаций.

3. Подготовка к работе

При подготовке к работе необходимо изучить:

1. Основные термины и определения технической диагностики: техническое диагностирование, техническое состояние, диагностический признак (параметр), объект (система) технического диагностирования [1, с. 7 - 9].
2. Понятия теории информации: энтропия системы, основные свойства энтропии, определение энтропии системы, измерение информации о состоянии системы [1, с. 8 - 15; 2].
3. Требования к диагностическим параметрам [1, с. 15 - 20].
4. Методику определения диагностической ценности признаков на основе теории информации [1, с. 8 - 20].

4. Вопросы для допуска к лабораторной работе

При проверке подготовленности студентам необходимо ответить на следующие вопросы:

1. Порядок учета отказов и неисправностей объектов диагностирования, выявления возможных состояний объекта и определения вероятностей этих состояний.
2. Структура объекта, структурные параметры и их изменение в процессе эксплуатации.
3. Физико-химические процессы повреждаемости, порождаемые функционированием объекта.
4. Требования, предъявляемые к диагностическим параметрам.
5. Принципы выбора диагностических признаков.

6. Сущность критерия информативности (диагностической ценности) признака.

5. Этапы проведения работы

1. Проверка подготовленности студентов.
2. Анализ газотурбинного двигателя как объекта диагностирования. Формирование конечного множества параметров, которые могут быть использованы для оценки технического состояния ГТД.
3. Ранжирование параметров (признаков), обладающих наибольшей диагностической ценностью, их выбор.
4. Диагностирование ГТД с использованием выбранных параметров.
5. Оформление работы и сдача преподавателю.
6. Подведение итогов занятия.

6. Оформление отчета

1. Дать краткую характеристику ГТД как объекта диагностирования.
2. Заполнить табл. 1.1 (прил.) "Распределение отказов и неисправностей ГТД".
3. Заполнить табл. 1.3 "Количество случаев m_{ij} появления признаков K_j в состоянии объекта D_i ".
4. Выполнить расчеты и занести в табл. 1.4:
 - безусловных вероятностей состояния $P(D_i)$;
 - безусловных вероятностей признаков $P(K_j)$;
 - условных вероятностей появления признака K_j в состоянии $D_i - P(K_j/D_i)$;
 - диагностической ценности проявления признака K_j в отношении состояния $D_i - Z_{D_i}(K_j)$;
 - диагностической ценности отсутствия признака K_j в отношении состояния $D_i - Z_{D_i}(\bar{K}_j)$;
 - диагностической ценности обследования двухзарядного признака в отношении состояния $D_i - Z_{D_i}(K_j)$;
 - общей диагностической ценности признака $K_j - Z_D(K_j)$.
5. Занести результаты расчетов в диагностическую табл. 1.5.
6. Сделать выбор признаков, определяющих с наибольшей достоверностью состояния ГТД.

7. Контрольные вопросы по лабораторной работе № 1

1. Газотурбинный двигатель как объект диагностирования.
2. Сущность анализа информации об отказах и неисправностях объекта диагностики.
3. Неоднозначность связи диагностических признаков с состояниями объекта.

4. Оценка взаимосвязи вероятностей состояний и диагностических признаков ГТД.
5. Что такое диагностическая ценность реализации признака $K_{jS} - Z_{D_i}(K_{jS})$ в состоянии объекта D_i ?
6. Что такое диагностическая ценность обследования двухразрядным признаком $K_j - Z_{D_i}(K_j)$ в состоянии объекта D_i ?
7. Общая диагностическая ценность признака $K_j - Z_D(K_j)$, ее физический смысл.

Объектом диагностирования является авиационный газотурбинный двигатель (ГТД), назначение которого – создание тяги в процессах разбега, взлета и посадки самолета, поддержание полета, в том числе обеспечение работы исполнительных ветвей функциональных систем ЛА, а также обеспечение комфортных условий в салоне самолета.

Двигатель состоит из ротора и статора. Роторная часть подразделяется на внутренний и внешний контуры. Воздух, проходя через проточную часть ГТД, смешивается с топливом во внутреннем контуре. Сгоревшая смесь создает импульс силы на выходе из реактивного сопла, создавая тягу. Внешний контур также создает тягу благодаря разгону воздуха и его прохождению через спрофилированный выход. Качество функционирования двигателя оценивается по комплексу параметров, регистрируемых в полете и на земле при техническом обслуживании ЛА. К важнейшим диагностическим параметрам ГТД относятся:

- уровень вибраций;
- выбег ротора (время остановки ротора после выключения двигателя);
- величина скольжения роторов (разница частот вращения роторов первого и второго контуров);
- температура масла, а также температура выхлопных газов на срезе сопла;
- концентрация продуктов износа в масле;
- расход топлива.

8. Методические указания к выполнению лабораторной работы

Для такого сложного объекта диагностирования, как ГТД, трудно заранее указать все возможные состояния, однако к этому надо стремиться, тщательно фиксируя на всем этапе «жизненного цикла» все неисправности или отказы (предотказные состояния) и их причинно-следственные связи. Учет, анализ отказов и неисправностей производится для решения следующих задач:

- определения возможных состояний (классов, диагнозов) ГТД и вероятностей их появления;
- определения причин возникновения и признаков проявления неисправностей;

- составления диагностических таблиц и выбора диагностических параметров (признаков), которые будут использоваться в дальнейшем.

В качестве исходных материалов для анализа служат следующие источники информации:

- данные из руководства по технической эксплуатации (РТЭ) ГТД;
- результаты исследований отказавших ГТД, поступивших на завод-изготовитель или ремонтные заводы ГА;
- результаты измерения параметров ГТД при штатном функционировании и опробовании ГТД в процессе ТО.

На основе собранной информации об отказах и неисправностях составляется табл. 1.1.

Результаты измерений параметров при техническом обслуживании и ремонте, а также регистрации диагностических параметров (признаков) в полете позволяют составить табл. 1.2, содержащую информацию о качественной связи признаков и состояний. В табл. 1.2 в строках записаны часто встречающиеся неисправные состояния ГТД, а в столбцах - параметры (признаки), с помощью которых эти неисправные состояния могут быть выявлены при проверке. Если признак K_j ($j = 1, 2, \dots, r$) реализуется в i -м ($i = 1, 2, \dots, l$) состоянии, то в строке D_i , ставится единица, а если не реализуется – ноль (эти признаки исключаются из дальнейшего анализа).

Табл. 1.2 не учитывает количественных соотношений между признаками и состояниями (в клеточках с цифрой 1). Для получения таких соотношений на базе априорных данных (по результатам наблюдений) формируется табл. 1.3.

На пересечении строк D_i и столбцов этой таблицы вносятся числа проявления признака K_j в состояниях D_i ($i = 1, 2, \dots, l; j = 1, 2, \dots, r$). Правый столбец табл. 1.3 заполняется числами n_i нахождения ГТД в каждом i -м состоянии.

В последней строке табл. 1.3 приводится число m_j проявления признака K_j во всех возможных состояниях.

В табл. 1.4, которая заполняется так же, как и табл. 1.3, записываются вычисленные отдельно вероятности проявления, а также не проявления признаков $\overline{K_j}$. Значения условных вероятностей признаков вычисляются по данным табл. 1.3 по формуле:

$$P(K_j / D_i) = \frac{m_{ji}}{n_i} \quad (1.1)$$

$$P(\overline{K_j} / D_i) = \frac{m_{i\overline{j}}}{n_i}$$

Значения вероятностей не проявления признака вычисляются по данным той же таблицы по формуле:

$$P(\bar{K}_j / D_i) = \frac{\bar{m}_{ij}}{n_i}$$

где $\bar{m}_{ij} = n_i - m_{ij}$.

Правая колонка табл. 1.4 заполняется значениями вероятности нахождения ГТД в одном из восьми состояний, которые вычисляются по формуле:

$$P(D_i) = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^l n_i} \quad (1.2)$$

В последней строке таблицы приводим вероятности проявления признака K_j во всех исследуемых состояниях ГТД:

$$P(K_j) = \frac{\sum_{j=1}^r m_{ij}}{\sum_{i=1}^l n_i} \quad (1.3)$$

Затем необходимо подсчитать диагностические веса реализации представленных в табл. 1.4 признаков и диагностическую ценность обследования по выбранным признакам. В общем случае признак K_j имеет m возможных альтернативных значений. В инженерной практике обычно пользуются обследованием по двухразрядным, трехразрядным и т.д. признакам, обладающим двумя, тремя возможными реализациями.

В качестве диагностического веса реализации признака K_{js} для состояния (диагноза) D_i принимаем величину, обозначаемую

$$Z_{Di}(K_{js}) = \log_2 \frac{P(K_{js} / D_i)}{P(K_j)} \quad (1.4)$$

где $P(K_{js} / D_i)$ - вероятность проявления K_{js} признака K_j для объектов, имеющих состояние D_i ;

$P(K_j)$ - вероятность проявления значения K_{js} для всей совокупности состояний D_s исследуемых объектов.

Величина $Z_{Di}(K_{js})$ называется **диагностическим весом реализации признака K_j для состояния D_i** . Она пропорциональна диагностической ценности информации.

Диагностическая ценность обследования по признаку K_j с учетом всех его возможных реализаций (m -разрядов) подсчитывается так:

$$Z_{D_i}(K_j) = \sum_{i=1}^m P(K_{js} / D_i) \cdot Z_{D_i}(K_{js}) \quad (1.5)$$

Например, диагностическую ценность (информативность) обследования для двухразрядного (простого) признака можно определить следующим образом:

$$Z_{D_i}(K_j) = P(K_{js} / D_i) \cdot Z_{D_i}(K_{js}) + P(\bar{K}_{js} / D_i) \cdot Z_{D_i}(\bar{K}_{js}), \quad (1.6)$$

где

$$Z_{D_i}(K_{js}) = \log_2 \frac{P(K_{js} / D_i)}{P(K_j)}, \quad Z_{D_i}(\bar{K}_{js}) = \log_2 \frac{P(\bar{K}_{js} / D_i)}{P(\bar{K}_j)} - \text{соответствующие}$$

диагностические ценности проявления и не проявления (\bar{K}_j) признака K_j по отношению к состоянию D_i ;

$P(K_{js} / D_i); P(\bar{K}_{js} / D_i)$ - соответственно вероятности проявления и не проявления признака K_j в состоянии D_i ;

$P(K_j); P(\bar{K}_j)$ - вероятности проявления и не проявления признака K_j во всех возможных состояниях D .

Диагностическая ценность обследования по признаку K_j для какого-либо одного состояния не отражает привязанность признака K_j для всего спектра возможных состояний (в простом понимании - реакция признака на каждое из возможных состояний). Поэтому вводится понятие **общей диагностической ценности по признаку K_j для системы состояний D** , которая находится из выражения:

$$Z_{D_i}(K) = \sum_{i=1}^n P(D_i) Z_{D_i}(K_j) \quad (1.7)$$

Определив по формуле (1.7) общую диагностическую ценность для всех признаков и внося результат в табл. 1.5, выполняется последний этап заполнения таблицы. Данные табл. 1.4 и табл. 1.5 позволяют сделать два важных вывода:

- о приоритетности признаков в отношении возможных состояний ГТД;
- о необходимости комплексной диагностики ГТД при выявлении «адреса» отказа.

Эти выводы предлагается сформулировать студенту исходя из конкретных результатов его расчетов.

Лабораторная работа № 2

Оценка взаимосвязи диагностических признаков и состояний объектов АТ по методу Байеса

Работа включает в себя постановку диагноза объекта по методу Байеса (в соответствии с индивидуальным вариантом).

1. Цели работы

1. Усвоение и закрепление знаний по программе лекционного курса «Техническая диагностика».
2. Формирование навыков оценки диагностических признаков, обладающих максимальной информативностью.
3. Усвоение принципов формирования диагностических решений на основе полученных результатов.

2. Содержание работы

1. Анализ объекта диагностирования.
2. Формирование перечня признаков и их комбинаций, которые могут быть связаны с состояниями объекта.
3. Расчет количественных взаимосвязей комбинаций признаков с возможными состояниями объекта.
4. Составление диагностической программы.

3. Подготовка к работе

При подготовке к работе изучить:

1. Основные термины и определения технической диагностики: техническое диагностирование, техническое состояние, диагностический признак, диагностический параметр [1, с. 5 - 8; 2].
2. Понятие – информационная энтропия системы, основные свойства информационной энтропии, измерение информации о состоянии объекта (системы) [1, с. 8 - 15; 2].
3. Требования к диагностическим параметрам [1, с. 5 - 8].

4. Вопросы для допуска к лабораторной работе № 2

При проверке подготовленности студентам необходимо ответить на следующие вопросы:

1. Физическая сущность информационной энтропии, ее связь с задачами технической диагностики. Зарождение диагностической информации.
2. Требования, предъявляемые к диагностическим параметрам.
3. Разрядность диагностических признаков.
4. Принципы выбора диагностических признаков.

5. Этапы проведения работы

1. Проверка подготовленности студентов.
2. Анализ объекта диагностики, его параметры и признаки.
3. Анализ априорных взаимосвязей комбинаций диагностических признаков и возможных состояний объекта.
4. Расчеты взаимосвязей между комбинациями признаков и возможными состояниями по методу Байеса.
5. Оформление работы и сдача преподавателю.
6. Подведение итогов лабораторного занятия.

6. Оформление отчета

1. Дать краткую характеристику объекта диагностики.
2. Заполнить диагностическую матрицу (табл. 2.2).
3. Рассчитать вероятности взаимосвязей по Байесу и занести в табл. 2.3.
4. Проанализировать результаты и построить диагностическую программу.

7. Методические указания по решению диагностических задач с помощью метода Байеса

Постановка задачи при этом методе такова. Имеется объект, который в данный момент времени находится при одном из n случайных состояний D_i . Известна совокупность признаков (параметров) $K = (K_1, K_2, \dots, K_\nu)$, каждый из которых с определенной вероятностью характеризует состояние объекта. Требуется по совокупности проявления (непроявления) признаков отнести объект к одному из возможных состояний (классов, диагнозов) [1].

Итак, если имеется диагноз D_i и простой признак K_j , встречающийся при этом диагнозе, то вероятность совместного проявления этих событий (наличие у объекта состояния D_i и признака K_j) согласно формуле Байеса

$$P(D_i / K_j) = \frac{P(D_i) \cdot P(K_j / D_i)}{P(K_j)}, \quad (2.1)$$

где $P(D_i)$ – вероятность диагноза D_i по предварительным (априорным) статистическим данным. Так, если предварительно обследовано N объектов и у N_i объектов имелось состояние D_i , то

$$P(D_i) = \frac{N_i}{N};$$

$P(K_j / D_i)$ – вероятность появления признака K_j у объектов с состоянием D_i .

Если среди N_i объектов, имеющих диагноз D_i , у N_j проявляется признак K_j , то

$$P(K_j / D_i) = \frac{N_j}{N_i};$$

$P\langle K_j \rangle$ – вероятность появления признака K_j во всех объектах независимо от состояния (диагноза) объекта. Если из общего числа N объектов признак был обнаружен у N_j объектов, то

$$P\langle K_j \rangle = \frac{N_j}{N}.$$

Для установления диагноза величина $P\langle K_j \rangle$ может быть определена через значения $P\langle D_i \rangle$ и $P\langle K_j / D_i \rangle$, известные для всех возможных состояний;

$P\langle D_i / K_j \rangle$ – вероятность диагноза D_i после того, как стало известно наличие у рассматриваемого объекта признака K_j (апостериорная вероятность диагноза).

Общим является случай, когда обследование проводится по комплексу признаков K , включающему признаки K_1, K_2, \dots, K_v , каждый из которых имеет m_j разрядов $\langle K_{j1}, K_{j2}, \dots, K_{jv} \rangle$. В результате наблюдения становятся известными реализации комплекса признаков K .

Для определения вероятностей диагнозов по методу Байеса составляется диагностическая матрица (табл. 2.1), которая формируется на основе априорных статистических данных.

Таблица 2.1

Диагностическая матрица

Диагнозы D_i	Признаки				$P\langle D_i \rangle$
	K_1		K_2		
	$P\langle K_{11} / D_i \rangle$	$P\langle K_{21} / D_i \rangle$	$P\langle K_{12} / D_i \rangle$	$P\langle K_{22} / D_i \rangle$	
D_1					
·					
D_n					

В этой таблице содержатся вероятности разрядов признаков $P\langle K_{js} / D_i \rangle$ при различных диагнозах. Если признаки двухразрядные (простые признаки “да-нет”), то в таблице достаточно указать вероятность появления признака $P\langle K_j / D_i \rangle$. Вероятность отсутствия признака

$$P\langle \bar{K}_j / D_i \rangle = 1 - P\langle K_j / D_i \rangle. \quad (2.2)$$

Сумма вероятностей всех реализаций признака K_j равна единице

$$\sum_{s=1}^n P\langle K_{js} / D_i \rangle = 1,0.$$

При методе Байеса используется следующее правило: больший условный диагноз соответствует большей степени связи признаков и возможного состояния.

8. Решение целевой диагностической задачи

При наблюдении за объектом фиксируется два признака: K_1 и K_2 . Проявление этих признаков связано либо с неисправностью D_1 , либо с неисправностью D_2 , либо с нормальным состоянием объекта (состояние D_3).

Проявление различных сочетаний признаков K_1 и K_2 может с той или иной степенью достоверности указывать на конкретное состояние объекта из трех вышеперечисленных состояний. Сложность заключается в том, что сочетаний признаков четыре - $K_1K_2; \overline{K_1}K_2; K_1\overline{K_2}; \overline{K_1}\overline{K_2}$, а возможных состояний только три - D_1, D_2, D_3 . Метод Байеса позволяет корректно решить эту задачу. Рассмотрим этапы решения:

1. Сначала сведем априорные данные по проявлению (непроявлению) признаков K_1 и K_2 в диагностическую таблицу (табл. 2.2). Эти данные задаются преподавателем.

Таблица 2.2

Вероятности признаков и априорные вероятности состояний

D_i	$P(K_1/D_i)$	$P(\overline{K_1}/D_i)$	$P(K_2/D_i)$	$P(\overline{K_2}/D_i)$	$P(D_i)$
D_1					
D_2					
D_3					

2. Рассчитываем по формуле Байеса вероятности состояний, когда проявляются оба признака - $P(D_1/K_1K_2); P(D_2/K_1K_2); P(D_3/K_1K_2)$.
3. Определяем вероятности состояний объекта, если признак K_1 отсутствует, а K_2 наблюдается. Подсчитываются также $P(D_2/\overline{K_1}K_2); P(D_3/\overline{K_1}K_2)$.
4. Вычисляются вероятности состояний, когда признак K_1 наблюдается, а признак K_2 – отсутствует $P(D_1/K_1\overline{K_2}); P(D_2/K_1\overline{K_2}); P(D_3/K_1\overline{K_2})$.
5. Вероятности состояния при отсутствии обоих признаков K_1 и K_2 дают следующие результаты:
 $P(D_1/\overline{K_1}\overline{K_2}); P(D_2/\overline{K_1}\overline{K_2}); P(D_3/\overline{K_1}\overline{K_2})$.

Результаты заносятся в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Результаты диагноза

D_i	$P\langle \Phi_i / K_1 K_2 \rangle$	$P\langle \Phi_i / \bar{K}_1 K_2 \rangle$	$P\langle \Phi_i / K_1 \bar{K}_2 \rangle$	$P\langle \Phi_i / \bar{K}_1 \bar{K}_2 \rangle$
D_1				
D_2				
D_3				

6. Анализируются результаты с целью установления вероятностной взаимосвязи ситуации по признакам и возможным состоянием объекта. В основе выбора лежит максимальная величина вероятности в каждой из горизонтальных строк табл. 2.3, соответствующей каждому из возможных состояний D_i .
7. Ранжируем состояния D_i по степени опасности (влияния на безопасность полетов) и назначаем соответствующую последовательность проверок.

Пример

При наблюдении за газотурбинными двигателями фиксируется два признака: K_1 – повышение температуры газа за турбиной более чем на 50°C и K_2 – увеличение времени выхода на максимальную частоту вращения более чем на 5 с. Проявление этих признаков связано либо с неисправностью топливного регулятора (состояние D_1), либо с увеличением радиального зазора в турбине (состояние D_2), либо с нормальным состоянием двигателя (состояние D_3).

При нормальном состоянии D_3 двигателя признак K_2 не наблюдается, а признак K_1 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, 5% двигателей имеют состояние D_1 и 15% – состояние D_2 . Требуется поставить диагноз при возможных сочетаниях проверяемых признаков.

1. Сведем исходные данные в диагностическую таблицу (табл. 2.4). При этом вероятности отсутствия признаков $P\langle \bar{K}_j / D_i \rangle$ вычислим по формуле (2.2).

Таблица 2.4

Вероятности признаков и априорные вероятности состояний

D_i	$P\langle K_1 / D_i \rangle$	$P\langle \bar{K}_1 / D_i \rangle$	$P\langle K_2 / D_i \rangle$	$P\langle \bar{K}_2 / D_i \rangle$	$P\langle \Phi_i \rangle$
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	0.0	1.0	0.05	0.95	0.80

2. Найдем вероятности состояний, когда проявляются оба признака $P\Phi_1 / K_1 K_2$. Вероятность состояния D_1 при наличии признаков K_1 и K_2 :

$$P\Phi_1 / K_1 K_2 = \frac{0.05 \cdot 0.2 \cdot 0.3}{0.05 \cdot 0.2 \cdot 0.3 + 0.15 \cdot 0.4 \cdot 0.5 + 0.8 \cdot 0.05 \cdot 0.0} = 0.09.$$

Аналогично получим: $P\Phi_2 / K_1 K_2 = 0.91$; $P\Phi_3 / K_1 K_2 = 0$.

3. Определим вероятности состояний двигателя, если обследование показало, что повышение температуры не наблюдается (признак K_1 отсутствует), но увеличивается время выхода на максимальную частоту вращения (признак K_2 наблюдается).

$$P\Phi_1 / \bar{K}_1 K_2 = \frac{0.05 \cdot 0.8 \cdot 0.3}{0.05 \cdot 0.8 \cdot 0.3 + 0.15 \cdot 0.6 \cdot 0.5 + 0.8 \cdot 0.05 \cdot 1.0} = 0.12.$$

Аналогично: $P\Phi_2 / \bar{K}_1 K_2 = 0.46$; $P\Phi_3 / \bar{K}_1 K_2 = 0.42$.

4. Вычислим вероятности состояний, когда признак K_1 наблюдается, а признак K_2 - отсутствует:

$$P\Phi_1 / K_1 \bar{K}_2 = \frac{0.05 \cdot 0.2 \cdot 0.7}{0.05 \cdot 0.2 \cdot 0.7 + 0.15 \cdot 0.4 \cdot 0.5 + 0.8 \cdot 0.95 \cdot 0.0} = 0.19.$$

Аналогично: $P\Phi_2 / K_1 \bar{K}_2 = 0.81$; $P\Phi_3 / K_1 \bar{K}_2 = 0.0$.

5. Вычисления вероятностей состояния при отсутствии обоих признаков K_1 и K_2 дают следующие результаты:

$$P\Phi_1 / \bar{K}_1, \bar{K}_2 = 0.03; P\Phi_2 / \bar{K}_1, \bar{K}_2 = 0.05; P\Phi_3 / \bar{K}_1, \bar{K}_2 = 0.92.$$

Занесем результаты в табл. 2.5

Таблица 2.5

Результаты диагноза

D_i	$P\Phi_i / K_1 K_2$	$P\Phi_i / \bar{K}_1 K_2$	$P\Phi_i / K_1 \bar{K}_2$	$P\Phi_i / \bar{K}_1, \bar{K}_2$
D_1	0.09	0.12	0.19	0.03
D_2	0.91	0.46	0.81	0.05
D_3	0.00	0.42	0.00	0.92

6. Анализ результатов позволяет установить, что при наличии признаков K_1 и K_2 в двигателе с вероятностью 0,91 имеется событие D_2 (увеличение радиального зазора). При отсутствии обоих признаков наиболее вероятно нормальное состояние (вероятность 0,92). При отсутствии признака K_1 и наличия признака K_2 вероятности состояний D_2 и D_3 примерно одинаковы (0,46 и 0,42). В этом случае для уточнения состояния двигателя требуется проведение дополнительного обследования.
7. Ранжируем состояние D_i по степени опасности (влияния на безопасность полетов). В нашем случае последовательность состояний будет такова: $D_2 - D_1 - D_3$. Отсюда назначаем последовательность проверок:
- 1) проверяется K_1 и K_2 ;

- 2) проверяется K_1 и $\overline{K_2}$;
- 3) проверяется одновременное отсутствие обоих признаков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пивоваров В.А., Машошин О.Ф., Хрустиков С.Г., Санников А.В. Диагностика и неразрушающий контроль ЛАиАД: учеб. пособие. - М.: МГТУ ГА, 2011.
2. Пивоваров В.А., Машошин О.Ф. Диагностика АТ: пособие по изучению дисциплины. - М.: МГТУ ГА, 2007.

Приложение
Таблица 1.1

**Распределение отказов и неисправностей газотурбинного двигателя
(априорные данные)**

№	Признаки неисправных состояний	По карточкам учета неисправностей			По результатам разборки	
		Общее кол-во случаев	%	Предполагаемые неисправные состояния	Установленная причина отказа	Число случаев
1	2	3	4	5	9	10
1	Нарушено скольжение роторов	38	52,7	Попадание посторонних предметов в компрессор	Забойны на лопатках компрессора. Отказ одного из подшипников	30 8
2	Повышенная вибрация	24	33,4	Предотказное состояние подшипников	Недопустимое увеличение радиального зазора в среднем подшипнике. Коробление дефлекторов дисков турбины	20 4
3	Укороченный выбег ротора, сопровождающийся скрежетом	7	2,8	Радиальная растяжка деталей ротора турбины	Вытяжка рабочих лопаток турбины из-за перегрева материала. Касание лопаток статора из-за поврежденных от ППП	2 5
4	Наличие стружки на фильтре	2	2,8	Разрушены детали маслонасоса	Насос исправен	2
5	Повышенная температура газов на срезе сопла	6	8,3	Без указания причин	Неправильная регулировка топливной аппаратуры. Повышенный износ золотника ТНР Прогар сопловых аппаратов.	2 2 2
	Итого	77	100			77

Таблица 1.2
Связь диагностических признаков с состояниями ГТД

Состояния насоса (D)	Признаки (K)							
	Повышен-ные параметры вибраций (K ₁)	Повышение темп-ры на срезе сопла (K ₂)	Нарушение скольжения роторов (K ₃)	Повышенная концентрация примесей в масле (K ₄)	Повышен. расход топлива (K ₅)	Укороченное время выбега ротора (K ₆)	Повышен. темп-ра масла (K ₇)	Скрежет при прокру-чивании ротора (K ₈)
D ₁ Попадание посторонних предметов	1	1	1	0	1	1	1	0
D ₂ Предотказное состояние подшипников	1	1	1	0	1	0	0	0
D ₃ Прогар камеры сгорания	1	1	1	0	0	1	0	0
D ₄ Коробление дефлекторов турбины	1	1	1	1	1	0	0	1
D ₅ Нарушение зазора в бандажных полках лопаток КНД	0	1	0	0	0	0	0	0
D ₆ Износ шестерен центрального привода	1	0	0	0	0	0	0	1
D ₇ Нарушение герметичности маслосистемы	1	0	0	1	0	0	0	0

Таблица 1.3

Статистические данные о проявлении признаков в различных состояниях
ГТД

Состояния ГТД (D_i)	Наблюдаемое число m_j признака K_j в состоянии D_i					Наблюдае мое число n_j состояния D_i
	Повышенные параметры вибрации (K_1)	Повышение температуры на срезе сопла (K_2)	Нарушение скольжения роторов (K_3)	Повышенная концентрация примесей Fe в масле (K_4)	Повышенный расход топлива (K_5)	
D_1 попадание посторонних предметов						35
D_2 предотказное состояние подшипников						4
D_3 прогар камеры сгорания						12
D_4 коробление дефлекторов турбины						6
D_5 нарушение зазора в бандажных полках лопаток КНД						11
D_6 износ шестерен центрального привода						2
D_7 нарушение герметичности маслосистемы						5
D_8 исправное состояние						300
Наблюдаемое число s признака K_j во всех состояниях						375

Таблица 1.5

Диагностическая таблица

Состояние ГТД	Признаки K				
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5
	Повышенные параметры вибрации	Повышение температуры на срезе сопла	Нарушение скольжения роторов	Повышенная концентрация примесей Fe в масле	Повышенный расход топлива
D_1					
D_2					
D_3					
D_4					
D_5					
D_6					
D_7					
D_8 исправное состояние					
Вероятность проявления или не проявления признака во всех состояниях					
Общая диагностическая ценность признака					

Содержание

Вводные замечания.....	3
Лабораторная работа № 1. Оценка информативности диагностических признаков и их выбор.....	4
Лабораторная работа № 2. Оценка взаимосвязи диагностических признаков и состояний объектов АТ по методу Байеса.....	10
Литература.....	16
Приложение.....	17