

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

Кафедра двигателей летательных аппаратов

О.Ф. Машошин

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Тексты лекций

*Утверждено редакционно-
издательским советом МГТУ ГА
в качестве учебного пособия*

Москва
ИД Академии Жуковского
2021

УДК 629.7.07+629.7.03.004

ББК 052-082

М38

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Московского государственного технического университета ГА

Рецензенты:

Киселев М.А. (МГТУ ГА) – д-р техн. наук, профессор;

Шапкин В.С. (НИЦ «Институт им. Н.Е. Жуковского») – д-р техн. наук, профессор

Машошин О.Ф.

М38

Техническая диагностика летательных аппаратов и авиационных двигателей [Текст] : тексты лекций / О.Ф. Машошин. – М. : ИД Академии Жуковского, 2021. – 100 с.

ISBN 978-5-907275-95-9

Тексты лекций предназначены для обучающихся по специальности, изучающих дисциплину «Техническая диагностика летательных аппаратов и авиационных двигателей».

В учебном пособии изложены тексты лекций по основам формирования, обработки и использования диагностической информации при техническом обслуживании летательных аппаратов и авиационных двигателей. Даны основные сведения о методах диагностики планера, двигателя, функциональных систем самолетов ГА, включая методы аналитической диагностики и диагностики повреждаемости АТ.

Пособие предназначено для обучающихся III курса специальности 25.05.05 профиля «Организация технического обслуживания и ремонта воздушных судов» очной формы обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 29.01.2021 г. и методического совета 30.01.2021 г.

УДК 629.7.07+629.7.03.004

ББК 052-082

Св. тем. план 2021 г.

поз. 7

МАШОШИН Олег Федорович ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Тексты лекций

В авторской редакции

Подписано в печать 19.05.2021 г.

Формат 60x84/16 Печ. л. 6,25 Усл. печ. л. 5,81

Заказ № 756/0330-УП03 Тираж 30 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., д. 6А

Тел.: (495) 973-45-68 E-mail: zakaz@itsbook.ru

ISBN 978-5-907275-95-9

© Московский государственный технический
университет гражданской авиации, 2021

Содержание

Предисловие.....	4
РАЗДЕЛ I.	
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕНЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ПРИ РАБОТЕ	
Лекция 1. Оценка работавших конструкций по их механическим характеристикам.....	5
.....	
Лекция 2. Природа изменения ФМХ материала под нагрузкой.....	14
Лекция 3. Закономерности развития трещин в процессе работы авиаконструкций.....	29
РАЗДЕЛ II.	
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ	
Лекция 4. Задачи технической диагностики. Основные понятия и термины..	37
Лекция 5. Энтропийные модели распознавания состояний АТ. Диагностическая ценность признаков.....	45
Раздел III.	
АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ АТ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ	
Лекция 6. Методы линейных диагностических матриц. Методы анализа в пространстве признаков.....	58
Лекция 7. Метод Байеса и методы статистических решений.....	67
РАЗДЕЛ IV.	
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ АВИАКОНСТРУКЦИЙ	
Лекция 8. Основные принципы и методы прогнозирования состояния авиаконструкций. Технология формирования моделей поведения диагностических параметров по наработке.....	73
РАЗДЕЛ V.	
ПРИКЛАДНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ АТ	
Лекция 9. Организация служб диагностики в подразделениях ГА. Информационное обеспечение процессов диагностирования АТ.....	84
Лекция 10. Характеристики прикладных методов диагностики АТ.....	88
ЛИТЕРАТУРА.....	99

ПРЕДИСЛОВИЕ

В современном мире авиации постоянно возрастающие требования к безопасности полетов, безотказности и долговечности изделий делают весьма важной оценку технического состояния различных функциональных систем, узлов, агрегатов, деталей планера и силовых установок авиационной техники. В системе технической эксплуатации АТ особая роль отведена диагностике, с помощью которой оценить техническое состояние объектов возможно при помощи известных аналитических и инструментальных методов.

Термин «**ДИАГНОСТИКА**» греческого происхождения (*diagnostikos*), состоящий из слов - *dia* (между, врозь, после, через, раз) и *gnosis* (знание). Таким образом, слово *diagnostikos* можно трактовать, как способность распознавать. Значит техническая диагностика — наука о распознавании состояния объекта, включающая широкий круг проблем, связанных с получением и оценкой диагностической информации [1].

Диагностика авиационной техники – это современная наука, которая постоянно совершенствуется, находится в поиске нового, ранее неизведанного. Стремление человека понять сущность физических процессов, заложенных природой и возникающих в авиационных конструкциях флуктуаций при эксплуатации АТ, постоянно движет эту науку вперед.

Здесь на первом этапе важно знать спектр эксплуатационных нагрузок, сопровождающих работу авиационных материалов, на втором этапе - процессы повреждаемости деталей авиационной техники, которые могут закладываться еще при их производстве. И, наконец, на третьем этапе – умело применить методы технической диагностики, позволяющие предупредить или выявить отказ, либо выход из строя модуля или узла ответственных агрегатов элементов АТ.

Целью данного учебного пособия является помочь студентам разобраться в лекционном материале при изучении методов и средств технической диагностики летательных аппаратов и двигателей, а также в

методологии постановки задач технического диагноза, обоснованного выбора конкретных принципов и методик диагностики и соответствующих им правил принятия решения.

Тексты лекций базируются на обширном, ранее изданном материале, в т.ч., с участием автора, который читает лекции студентам МФ разных направлений подготовки и специальностей уже на протяжении более 20 лет, известных и перспективных методах технической диагностики, общей теории распознавания отказов, основах теории информации.

Курс данной дисциплины в соответствии с учебным планом рассчитан на 20 часов (10 лекций).

Следует отметить, что достижение цели, поставленной при изучении и освоении настоящего учебного пособия, обеспечивается тем, что студент заранее должен знать логические и статистические методы распознавания, методы разделения в пространстве системы диагностических признаков и состояний, статистических решений, показатели надёжности и законы распределения отказов изделий, уметь рассчитывать показатели надёжности и давать их оценку по статистической информации об отказах при эксплуатации и испытаниях авиационной техники.

РАЗДЕЛ I.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕНЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ПРИ РАБОТЕ

Лекция 1. Оценка работавших конструкций по их механическим характеристикам

Несмотря на широкое применение в последнее время в конструкции авиационной техники композитных материалов на основе углеродных, стекло и арамидных волокон в сочетании с эпоксидными и гетероциклическими полимерными матрицами различного строения, подавляющее большинство

изделий авиационных конструкций изготовлено из металлов – таких как, легкие сплавы (Д16Т, В95, АМЦ, АЛ, АК), конструкционные стали (30ХГСНА, ШХ15), жаропрочные сплавы (ХН77ТЮР, ЖС6К(П), ЭИ652) и др. Различные виды действующих рабочих нагрузок например, растяжение и сжатие, изгиб и кручение, сдвиг, срез, наклеп и др., воздействуя на металлы более или менее длительное время, приводят к выработке ресурса авиационных изделий, а также к снижению их несущей способности и в дальнейшем к разрушению. Эти стадии могут сопровождаться как внешними признаками (значительный износ, эрозия, коррозия, повышенная вибрация), так и внутренними факторами - скрытыми превращениями в структуре металлов, заложенными в процессе создания и формообразования деталей.

Обобщенную оценку состояния металлов на различных стадиях эксплуатации можно сформировать, отслеживая и проводя измерения их физико-механических характеристик (ФМХ) при механических испытаниях, которые проводят как в лабораторных, так и в производственных условиях. Что же это за критерии, относительно которых с наработкой и формируются процессы повреждаемости в авиационных материалах?

Из курса сопротивления материалов известны следующие ФМХ - $\sigma_{0.1}$ (предел упругости), $\sigma_{0.2}$ (предел текучести), σ_B (предел кратковременной прочности), $\sigma_{дл}$ (предел длительной прочности), σ_{-1} (условный предел выносливости), НВ (предел твердости по Бринеллю), относительные удлинение δ и сужение ψ и др.

Рассмотрим классическую диаграмму растяжения на примере малоуглеродистой стали (Ст-3, ВКС-8), которая показывает зависимость между растягивающей силой P , действующей на образец, и вызываемой ею деформацией Δl (рис. 1).

Отметим на диаграмме пять характерных точек:

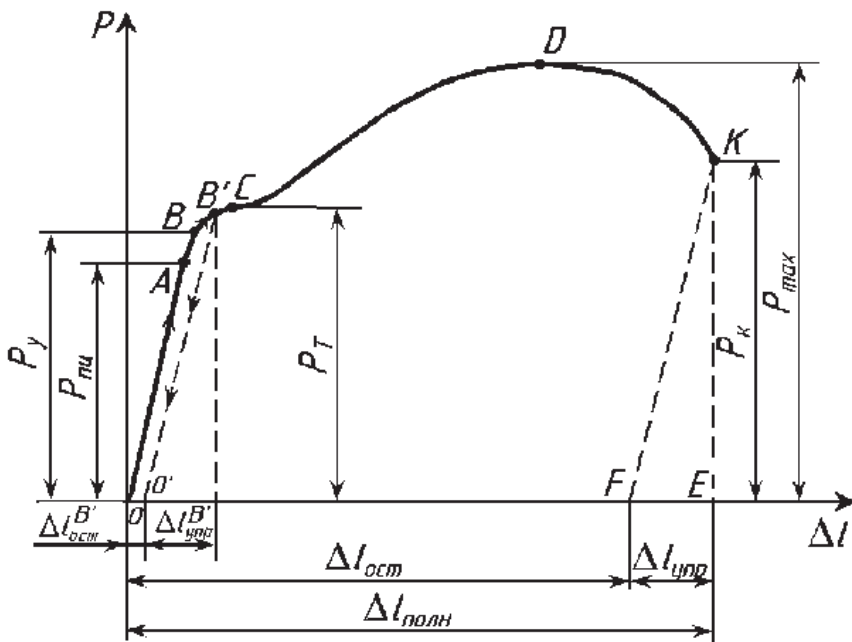


Рис.1 Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали

Прямолинейный участок диаграммы OA указывает на пропорциональность между нагрузкой P и удлинением Δl (т.н. закон Гука).

Величина силы $P_{пл}$ (точка A), до которой остается справедливым закон Гука, зависит от размеров образца и физических свойств материала.

Если испытуемый образец нагрузить растягивающей силой, не превышающей величину ординаты точки B (силы P_y ($\sigma_{0.1}$)), а потом разгрузить, то при разгрузке деформации образца будут уменьшаться по тому же закону, по которому они увеличивались при нагружении. Следовательно, в этом случае в образце возникают только упругие деформации.

В случае, если растягивающее усилие выше P_y , при разгрузке образца деформации полностью не исчезают и на диаграмме линия разгрузки будет представлять собой штрих-прямую линию $B'O'$, уже не совпадающую с

линией нагружения, а параллельную ей. В этом случае деформация образца состоит из упругой $\Delta l_{\text{упр}}^B$ и остаточной (пластической) $\Delta l_{\text{ост}}^{B'}$ деформации.

Таким образом, характерной особенностью точки B является то, что при превышении нагрузки P_y образец испытывает остаточные деформации при разгрузении.

Выше точки B диаграмма растяжения значительно отходит от прямой (деформация начинает расти быстрее нагрузки, и диаграмма принимает криволинейный вид), а при нагрузке, соответствующей P_m (точка C ($\sigma_{0.2}$)), переходит в горизонтальный участок – площадки текучести. В этой стадии испытания в материале образца по всему его объему распространяются пластические деформации. Образец получает значительное остаточное удлинение практически без увеличения нагрузки.

Свойство материала деформироваться при практически постоянной нагрузке называется текучестью. Участок диаграммы растяжения, параллельный оси абсцисс, называется площадкой текучести.

В процессе текучести на отшлифованной поверхности образца можно наблюдать появление линий (полос скольжения), наклоненных примерно под углом 45° к оси образца (рис. 2а). Эти линии являются следами взаимных сдвигов кристаллов, вызванных касательными напряжениями.

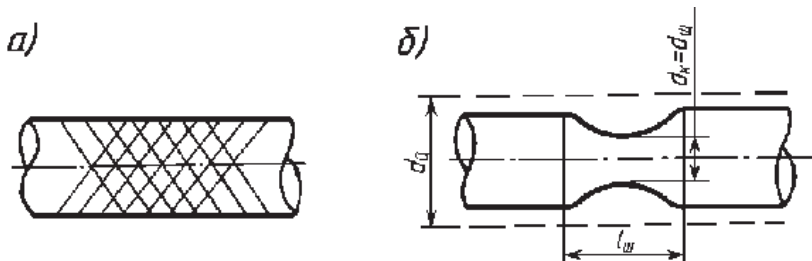


Рис.2 Образование линий сдвига (а) и местного сужения—шейки (б)

Линии сдвига называются линиями Чернова по имени знаменитого русского металлурга Д. К. Чернова (1839 - 1921), впервые обнаружившего их.

Удлинившись на некоторую величину при постоянном значении силы, т.е. претерпев состояние текучести, материал снова приобретает способность сопротивляться растяжению, а значит упрочняется, и диаграмма поднимается вверх, хотя гораздо более полого, чем раньше. В точке D усилие достигает максимального значения ($P_{max} (\sigma_B)$).

Наличие участка упрочнения (от конца площадки текучести до наивысшей точки диаграммы растяжения) объясняется микроструктурными изменениями материала: когда нагрузка на образец возрастает, микроскопические дефекты (линейные и точечные) группируются так, что развитие сдвигов кристаллов, вызванных касательными напряжениями, затрудняется, а потому сопротивление материала сдвигу начинает возрастать и приближаться к его сопротивлению отрыву.

При достижении усилия P_{max} на образце появляется резкое местное сужение, т.н. шейка (рис. 2б), быстрое уменьшение площади сечения которой вызывает падение нагрузки, и в момент, соответствующий точке K диаграммы, происходит разрыв образца по наименьшему сечению шейки.

До точки D диаграммы, соответствующей P_{max} , каждая единица длины образца удлинилась примерно одинаково; точно так же во всех сечениях одинаково уменьшались поперечные размеры образца. С момента образования шейки вся деформация образца локализуется на малой длине ($l_{ш} \sim 2d_0$) в области шейки, а остальная часть образца практически не деформируется.

Абсциссы диаграммы растяжения отрезков OE , OF и FE , характеризующие способность образца деформироваться до наступления разрушения, соответствуют полному абсолютному удлинению образца $\Delta l_{полн}$, остаточному абсолютному удлинению $\Delta l_{ост}$ и абсолютному упругому удлинению образца $\Delta l_{упр}$.

Для определения упругой деформации в момент разрыва необходимо из точки K диаграммы провести прямую KF , параллельную прямолинейному

участку OA , так как упругие деформации при разрыве также подчиняются закону Гука.

Хрупкие материалы, типичным представителем которых является чугун, дают диаграмму растяжения иного характера (рис. 3).

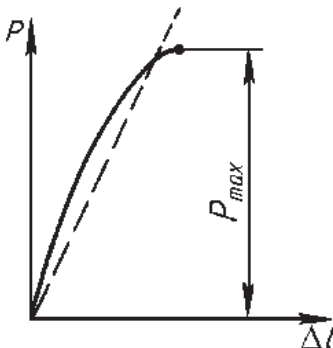


Рис.3 Диаграмма растяжения чугуна

Чугун разрушается внезапно при весьма малых деформациях, составляющих порядка 0,5-0,6% от расчетной длины образца l_0 , и без образования шейки. Диаграмма при этом не имеет явно выраженного прямолинейного участка (отклонение от закона Гука начинается очень рано), площадки текучести и зоны упрочнения.

При испытании на растяжение хрупких материалов определяют, как правило, только максимальную нагрузку P_{max} .

Обычно при практических расчетах для хрупких материалов отклонение от закона Гука не учитывают, т. е. криволинейную диаграмму заменяют условной прямолинейной диаграммой.

При оценке ФМХ металлов по результатам натурных механических испытаний предполагается наличие определенной связи между механическими свойствами металла и поведением образцов при смоделированных процессах нагружения и деформации. Однако, это мало эффективно, т.к. связано с большими материальными и временными

затратами.

Эффективный результат может быть достигнут, если проводить измерения только тех характеристик металлов, которые прямо связаны с потенциальным видом разрушения элемента в эксплуатации. Выбор таких характеристик возможен на основе многофакторного анализа отказавших элементов, выявления диагностических признаков, однозначно указывающих на вид разрушающей нагрузки. Для элементов механических систем эту задачу помогает решить изучение поверхностей разрушения (изломов) [2]. Взаимосвязь между структурой излома и конкретным видом разрушения может быть подтверждена также результатами металлофизического анализа.

На изломах, как правило, имеют место четкие признаки характера разрушения металлов при следующих видах нагружения: кратковременном статическом при нормальной температуре (например, стойки шасси), длительном статическом при повышенной температуре (характерно для дисков и лопаток турбин) и вибрационно-циклическом (повторно-переменном) - при нормальной температуре (рабочие лопатки компрессора и т.п.).

При сверхсильном кратковременном статическом нагружении конструкции ее разрушение носит обычно внезапный характер. Опять же из курса "Сопrotивление материалов" известны следующие критерии внезапной потери несущей способности материалов при воздействии повышенных нагрузок [3]:

-максимальных главных напряжений (полагают, что разрушение наступает при условии $\sigma_{\max}=\sigma_{0.1}$);

-максимальных касательных напряжений ($\tau_{\max}=\sigma_{0.2}$);

-накопленной энергии деформирования (критерием разрушения является фиксированная энергия деформирования, накопленная от начала появления необратимых деформаций материала до предельного напряжения);

-энергии сдвиговой деформации (разрушение наступает, когда энергия сдвиговой деформации в сложном напряженном состоянии станет равной

энергии деформации при одноосном растяжении);

-максимальных главных деформаций (критерий Сен-Венана). Максимальная деформация, соответствующая разрушению, связана с напряжениями, ориентированными по трем осям σ_1 , σ_2 , σ_3 , модулем упругости E и коэффициентом Пуассона ν соотношением:

$$\varepsilon = (\sigma_1 - \nu\sigma_2 - \nu\sigma_3)/E. \quad (1)$$

На практике действие перечисленных критериев можно наблюдать, например, при недопустимо грубой посадке самолета (ударные нагрузки на элементы шасси, силовые консоли крыла и т. п.). В реальных условиях эксплуатации эти критерии измерить нельзя, но они ценны тем, что ориентируют нас на главные показатели прочностных свойств материала шасси, каковыми будут: предел упругости $\sigma_{0,1}$, предел текучести $\sigma_{0,2}$, а также относительные удлинение δ и сужение ψ .

Известна тесная корреляция, например, между относительным сужением ψ и твердостью по Бринеллю (НВ). Зная опасные зоны конструкции (обычно это места расположения конструктивных концентраторов напряжений), а также пределы изменений НВ, можно с помощью переносного твердомера диагностировать приближение элементов шасси к предотказному состоянию. Такого рода испытания могут быть отнесены к категории неразрушающих.

При воздействии длительно приложенных статических нагрузок и повышенных температур оценивают, по возможности, две группы характеристик: предел длительной прочности ($\sigma_{дл}$) и максимальную деформацию (ξ_{\max}). Для дисков турбин ГТД, например, наиболее информативной и удобной для измерения величиной является максимальная накопленная деформация, которую можно зафиксировать по характерному скрежету о лабиринтные уплотнения статора при ручной прокрутке ротора газотурбинного двигателя (ГТД). У рабочих лопаток турбины о недопустимых деформациях может свидетельствовать наличие "шейки" (утонения) на профильной части.

Для того чтобы оценить степень усталости материала, можно сделать

ряд косвенных проверок (оценить однородность поверхностного слоя (т.н. гетерогенность), степень его упрочнения, распределение остаточных напряжений и т. п.) или провести усталостные испытания на образцах, по результатам которых принимать решение о возможности дальнейшей эксплуатации конструкции (это часто применимо в отношении лопаток компрессора).

Приведенные примеры выбора параметров состояния ФМХ материала построены на основе логического анализа физической модели конструкции (объекта). Существует ряд других подходов в выборе характеристик, отражающих несущую способность конструкции при определенном виде нагружения, в частности, на основе экспертных, статистических оценок, оценки "чувствительности" физико-механического параметра, оценки его информативности и т.д.

Экспертный подход основан на использовании рекомендаций экспертов-специалистов, имеющих опыт в данной области исследований механических свойств материалов[4]. Статистические оценки основаны на подсчете частоты реализаций параметров при аварийных состояниях материала и выборе на этой основе приоритетной группы параметров[5].

При выборе параметров по результатам оценки их "чувствительности" ориентируются на параметры математических, чаще всего линейных моделей старения конструкции материала, выраженных в виде взаимосвязей параметров и ее несущей способности на этапе жизненного цикла[6].

Использование информативных критериев позволяет достовернее выделить состояние материала из множества состояний. Это достигается путем аналитических оценок информации, вносимой каждым из параметров, по отношению к какому-либо конкретному состоянию[7].

Итак, подходов для выбора критериальных оценок несущей способности металлов достаточно много. Важен результат. К сказанному можно добавить, что правильно выбранные ФМХ позволяют фиксировать состояния металлов не только "на данный момент", но могут быть использованы как инструмент

оценки поведения материала при определенном виде нагружения, т. е. для прогноза на предстоящий период работы, что важно для практики.

Лекция 2. Природа изменения ФМХ материала под нагрузкой

Авиационные конструкции, отработавшие значительное количество часов в эксплуатации, чаще всего выходят из строя вследствие усталости материала, снижения несущей способности при длительном статическом нагружении или коррозии, а не вследствие износа (хотя в ряде случаев износ предшествует разрушению). Поэтому при диагностировании признаки, сопровождающие изменение прочности материала конструкции, являются более значимыми.

Диагностирование напряженности авиаконструкций

В ряду таких признаков на первом месте стоят остаточные деформации материала конструкций, которые, как доказано, появляются при любом уровне напряжений, если их действие было продолжительным. Деформации напрямую связаны с характеристиками пластичности материала (δ , ψ), о чем было изложено в первой лекции, которые вполне могут играть роль диагностических параметров (признаков). Несмотря на то, что рабочие нагрузки не превышают предела упругости, со временем наблюдается постепенное накопление необратимых деформаций. Например, в «холодных» деталях при среднем уровне нагружений за 12000 часов наработки накапливается необратимая деформация равная 0,04%. Величина накопленной деформации является весьма важным фактором, чем она больше, тем меньше остаточный ресурс авиационных конструкций.

Если имеется возможность осуществлять непрерывное наблюдение процесса изменения остаточных деформаций и пластичности материала конструкций, то можно говорить о серьезной профилактике прочностных разрушений (рис.4). Например, по отношению к длительной прочности для большинства жаропрочных сплавов (детали турбины ГТД) установлено, что

остаточная деформация, превышающая 0,25% с одновременным падением пластичности на 25 - 30%, однозначно свидетельствует о состоянии предразрушения. По характеристикам усталости эти цифры примерно на порядок ниже.

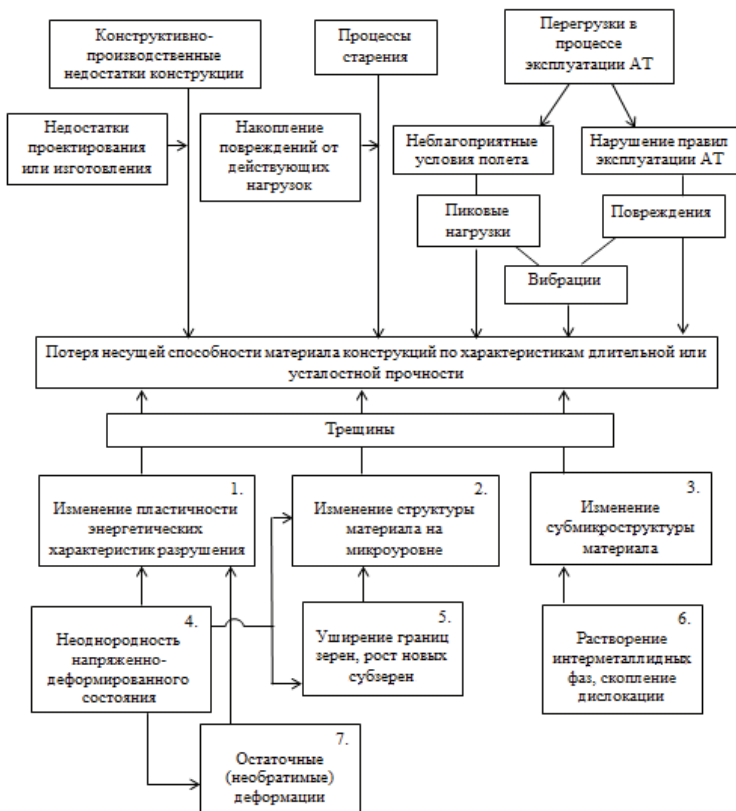


Рис.4. Причины и сопровождающие их явления при нарушении прочности авиаконструкций

На практике напряжения и деформации, воздействующие на конструкцию, могут быть определены с помощью т.н. тензопреобразователей.

Принцип действия большинства преобразователей (измерителей) деформаций основан на изменении удельного электрического сопротивления материала при его деформировании. Точность измерений проволоочных, фольговых (пленочных) или полупроводниковых преобразователей во многом зависит от качества их изготовления и способа препарирования. Как известно, связь между изменением сопротивления и деформацией в тензопреобразователях характеризуется чувствительностью k , которая определяется выражением:

$$k = \frac{\delta R / R}{\delta L / L} = \frac{\delta R}{\varepsilon R}, \quad (2)$$

где R - сопротивление преобразователя; δR - изменение сопротивления; L - длина (база) преобразователя; δL - изменение длины; εR - относительная деформация.

Существенным недостатком тензопреобразователей, который в большой мере ограничивает их возможности, является непостоянство во времени вышеуказанного соотношения.

Это непостоянство обусловлено процессом старения материала тензопреобразователей (проволочки, фольги), в результате чего могут иметь место значительные погрешности производимых измерений.

Таким образом, использование методов, не зависящих от времени, а также информативно значимых диагностических параметров, правильно отражающих трансформацию свойств материала с наработкой, всегда актуально.

Трибомониторинг

Среди методов диагностирования напряженности конструкций необходимо выделить склерометрический (трибоспектральный) или метод трибомониторинга (не путать с трибодиагностикой), который хорошо отражает степень гетерогенности (неоднородности поверхностного слоя) материала. Гетерогенность поверхности авиаконструкций всегда

увеличивается с наработкой и обусловлена физическими явлениями, отраженными на блок-схеме рис. 4. (пп. 1 - 7).

Метод трибомониторинга основан на сканировании (царапании) поверхности детали твердосплавным индентором по прямолинейной траектории с одинаковой скоростью и фиксированной нагрузкой.

Сканирование осуществляется на оборудовании, называемом склерометром. Индентор склерометра, имеющий форму конуса с углом при вершине обычно 120 градусов (рис.5), царапает поверхность детали в режиме упругопластического вытеснения (без снятия стружки).

В склерометре обеспечивается фиксированная нагрузка на исследуемую поверхность, а также возможность перемещения индентора с постоянной скоростью (рис.6.).

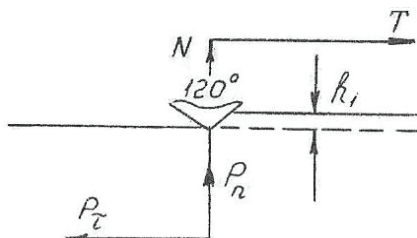


Рис.5.Схема склерометрического анализа металлов

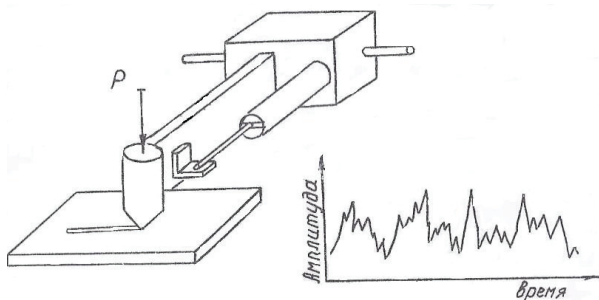


Рис.6. Схема сканирования при трибомониторинге

Перемещение индентора по поверхности - это процесс трения двух материалов - конуса и исследуемой детали. Их взаимодействие зависит от анизотропии прочностных свойств отдельных кристаллитов (зерен) детали. Для разной степени гетерогенности колебания балки с индентором будут иметь различный характер. Реализациями данного случайного процесса будут дискретные временные ряды нормальной и тангенциальной составляющих.

Обработка трибометрической информации методами теории случайных процессов осуществляется по программам формирования исходных массивов - устранения тренда и фильтрации массивов.

Устранение тренда в исходном массиве производится по методу наименьших квадратов [3] с использованием аппроксимирующего полинома 2-го порядка:

$$\dot{X}_i = X_i - \sum_{j=0}^2 b_j (i\Delta t)^j; \dot{Y}_k = Y_k - \sum_{j=1}^2 c_j (k\Delta t)^j, \quad (3)$$

где $i, k = 1, 2, \dots, N$; t - интервал дискретизации.

Фильтрация выполняется вычислением первой разницы:

$$\dot{X}_i = X_i - X_{i-1}; \dot{Y}_k = Y_k - Y_{k-1} \quad (4)$$

Для массива с устраненным трендом дополнительно вычисляются корреляционные функции реализаций R_{nx} и R_{ny} и реализации $X(t)$ и $Y(t)$.

В каждом из вариантов массивов трибометрической информации производится авто- и взаимный анализ реализаций $X(t)$ и $Y(t)$ случайных процессов с автоматическим вычислением на компьютере:

-математического ожидания

$$m_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i; m_y = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Y_k \quad (5)$$

-дисперсии

$$D_x = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2; D_y = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (Y_k - m_y)^2 \quad (6)$$

-среднеквадратического отклонения

$$\sigma_x = D_x^{0,5}; \sigma_y = D_y^{0,5}, \quad (7)$$

а также спектральной плотности

$$S(\omega)_x = \frac{2\Delta t}{N} \cdot \left(\sum_{i=0}^N x_i \exp(-j2\pi k_i / N) \right)^2$$

$$S(\omega)_y = \frac{2\Delta t}{N} \cdot \left(\sum_{i=0}^N y_i \exp(-j2\pi k_i / N) \right)^2, \quad (8)$$

где j - мнимая единица; k - номер гармоники.

Рассчитываются также:

-взаимная спектральная плотность нормальной и тангенциальной составляющих

$$S(\omega)_{xy} = \frac{2\Delta t}{N} (X_x^* \cdot Y_k), \quad (9)$$

где X_x^* - величина, комплексно сопряженная с X_x ;

-амплитудно-частотная характеристика системы

$$H_k = S(\omega)_{xy} / S(\omega)_x; \quad (10)$$

-функция когерентности (частотная корреляция)

$$Y_k^2 = S'(\omega)_{xy} / S(\omega)_x; \quad (11)$$

а также критерий α (отношение низко- и высокочастотных площадей спектральной плотности относительно срединной гармоники)

$$\alpha = \frac{\sum_{i=0}^{n/2} (S(\omega)_i)^2}{\sum_{x=n/2}^n (S(\omega)_x)^2}. \quad (12)$$

Представленные характеристики в совокупности описывают статистические свойства трибосистемы, как динамической системы и рассчитываются в ходе эксперимента. Рассмотрим физическую интерпретацию результатов, получаемых при обработке трибометрических измерений взаимодействия индентора с реальным поликристаллическим материалом.

Рассчитанные значения математического ожидания для тангенциальной составляющей отражают твердость HB материала. Величины дисперсий D_x и D_y , соответствующих составляющих, отражают гетерогенность материала. Значение спектральной плотности $S(\omega)$ характеризует частоту повторения в материале однородно-напряженных фрагментов определенного размера, изменение их прочности относительно средней прочности и распределение дисперсий прочности по частотам. Более однородному слою (относительно малой наработки) соответствует более высокочастотный и меньший по ширине график спектральной плотности (рис.7).

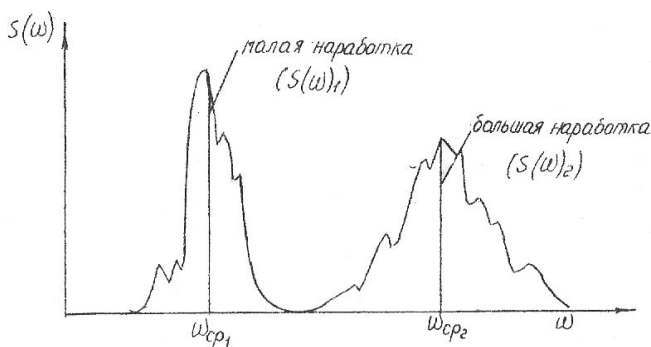


Рис.7. Типичные изменения спектральных плотностей при трибомониторинге

Пластичность, а также характеристики упругости материала могут определяться по величине Y_k^2 (п.7,рис.4). Отношение математических ожиданий тангенциальной и нормальной составляющих $m(P_\tau) / m(P_n)$, характеризует способность материала сопротивляться развитию пластических деформаций (косвенная оценка характеристик кратковременной прочности).

Коэффициент α служит для оценки степени охрупчивания (снижения пластичности) материала с наработкой (п.1, рис.4).

Таким образом, после обработки данных трибоспектральных измерений возможен качественный и количественный анализы состояния материала,

которые базируются на сравнении с объектами, имеющими нулевую наработку. На основании такого анализа возможна выдача рекомендаций о целесообразности дальнейшей эксплуатации авиаконструкции с точки зрения усталостной или длительной прочности с количественным обоснованием диагностических решений.

В качестве примера практического использования трибомониторинга можно привести результаты исследования автора лопаток компрессоров, используемых в ГА авиадвигателей ДЗО-КУ (КП, КУ-154).

Требовалось определить степень изменения выносливости материала лопаток (алюминиевый сплав ВД-17) с увеличением наработки.

Сформированные выборки лопаток (примерно по 7-9 штук) имели наработку в интервале от 0 до 9000 часов. Сканирование осуществлялось как в продольном (вдоль кромок), так и в поперечном направлениях. В совокупности длина трасс сканирования составила 2760мм, общее время сканирования - около 50 часов.

Результаты трибомониторинга представлены на рис.8.

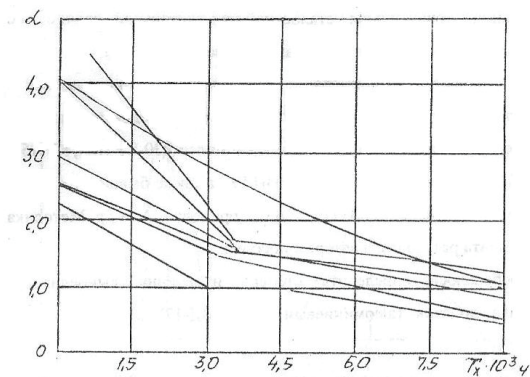


Рис.8. Изменение гетерогенности материала лопаток КНД двигателей ДЗО-КУ в зависимости от наработки

Как следует из графиков, в материале лопаток после воздействия рабочих нагрузок в течение указанной выше наработки улучшились характеристики однородности, что свидетельствует о предрасположенности к

улучшению усталостных свойств. Такой, на первый взгляд, неожиданный результат связан с эффектом тренинга материала (благоприятное упорядочение структуры при воздействии умеренных нагрузок), способствующим, в ограниченном интервале наработки, улучшению усталостных свойств, что в последствии было подтверждено результатами прямых испытаний лопаток на выносливость.

Итак, подводя итог сказанному, можно со всей определенностью утверждать, что метод трибомониторинга поверхностного слоя ответственных конструктивных элементов ВС вполне пригоден для оценки их остаточного ресурса при соблюдении ряда условий:

- обеспечение доступности к поверхности исследуемого элемента;
- эталонирование спектральных плотностей путем проведения предварительных экспериментов с объектами (элементами), имеющими различную наработку.

Метод ударного нагружения

Напомню, что несущую способность металлических материалов оценивают обычно путем измерения основных ФМХ, таких как: кратковременного сопротивления разрыву, предела текучести, предела упругости, характеристик пластичности, твердости, условного предела усталости, предела длительной прочности. Эти, т.н. стандартные характеристики отражены в справочной литературе и могут служить ориентирами в части потенциальных ресурсов конструктивных элементов. Сложность заключается в том, что измерение этих характеристик производится по результатам разрушающих испытаний образцов, что в большинстве практических случаев реализовать невозможно. В то же время необходимо отметить, что в число таких испытаний входят испытания, результаты которых обладают максимальной информативностью в отношении потенциальных ресурсов материалов конструкций. К их числу относится характеристика, называемая ударной вязкостью материала (KC), которая

рассчитывается как работа удара A , затраченная на пластическую деформацию и разрушение образца, отнесенная к площади поперечного сечения F в месте его надреза до испытания, т.е. $KC=A/F$. Ударная вязкость представляет собой удельную энергию разрушения образца от удара. Эта характеристика в физическом смысле дает представление о способности материала поглощать энергию удара за счет вязкости.

Если вырезать образец из работавшей конструкции (т.н. шлиф) и подвергнуть его разрушению на ударном копре индентором фиксированной массы, то, подобно трибомониторингу, можно диагностировать уровень прочностных свойств конструкции по характеристикам выносливости и длительной прочности.

Полную информацию о потенциальных свойствах материала можно получить при условии, когда удар индентора не полностью разрушает образец, т.е. когда пластическое деформирование при ударе не распространяется на все поперечное сечение образца.

Существует целый ряд зависимостей, связывающих размер повреждений при ударе и параметры самого удара [8]. Показано, что объем вытесненного материала при ударе пропорционален кинетической энергии индентора, т.е.:

$$E = V/Wo , \quad (13)$$

где E - удельная энергия пластической деформации при ударе; V - скорость удара; Wo -вытесненный при ударе объем повреждения.

Доказано также (Клейс И.Р. и др.), что величина E постоянна в широком диапазоне скоростей удара и не зависит от таких условий как: угол соударения (30 -90 гр.), диаметр индентора, наличия смазки в месте ударного контакта и др. Изменение E может быть вызвано только изменением свойств самого материала за счет сопротивления пластическому деформированию. Таким образом, величина E напрямую связана с накоплением эксплуатационных повреждений, т.к. пластичность - важнейший показатель длительной и усталостной прочности конструкции (см. рис. 4).

Для измерения E , вполне пригодны промышленные инерционные копры, предназначенные для определения ударной вязкости. Типовая схема такого рода испытаний приведена на рис.9.

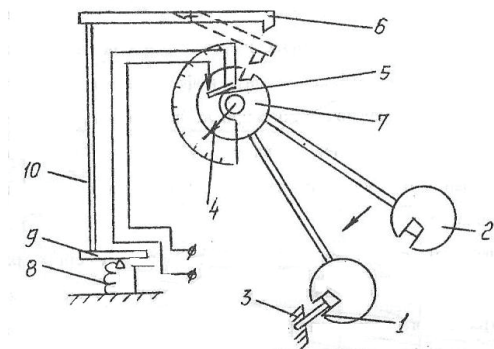


Рис. 9. Схема ударных испытаний материала с целью определения удельной энергии пластической деформации E :
 1-образец; 2-маятник (масса); 3-зажим; 4-стрелка, замыкающая контакты срабатывания защелки для предотвращения повторных ударов; 5- контакты срабатывания защелки; 6-защелка; 7-диск копра; 8-пружина; 9-якорь реле срабатывания защелки; 10-тяги.

Типовые зависимости изменения энергии пластической деформации E для металлических материалов авиаконструкций, отработавших различное число часов в эксплуатации, приведены на рис.10. Видно, что снижение ударной вязкости на 70% и более свидетельствует о практически полном исчерпании ресурса.

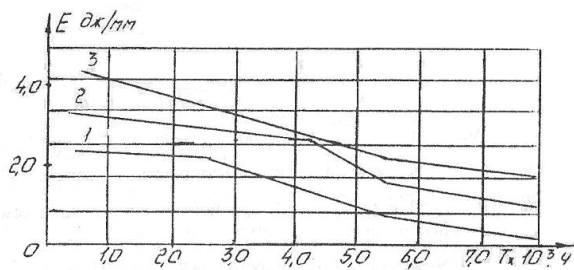


Рис. 10. Изменение E по наработке для различных групп материалов: 1-алюминиевые сплавы; 2 – конструкционные стали; 3-жаропрочные сплавы.

Диагностика концентрации напряжений

Общеизвестен факт концентрации напряжений в местах изменения геометрической формы нагруженного объекта или наличия механических повреждений [9]. В связи с этим очевидна актуальность диагностирования степени концентрации напряжений с целью профилактики возможных разрушений на предстоящий период работы.

Для оценки концентрации напряжений можно использовать несколько перспективных методов: хрупких лаковых покрытий, фотоупругости (оптической анизотропии), оптически активных покрытий, муаровых полос. Коротко прокомментируем эти методы.

Метод хрупких лаковых покрытий заключается в нанесении на поверхность конструкции тонкого высыхающего слоя лака. При нагружении материала в покрытии образуются трещины, перпендикулярные, направлению действия максимального растягивающего напряжения. Степень концентрации напряжений или деформаций оценивают, сравнивая растрескивание покрытия на конструкции и на плоских образцах под нагрузкой (при заданной температуре и влажности).

Оптический метод фотоупругости определения напряжений с помощью прозрачных моделей базируется на эффекте двойного лучепреломления, характерного для напряженных прозрачных материалов. Двойное лучепреломление - это раздвоение световых лучей при прохождении через анизотропную среду, происходящее вследствие зависимости показателя преломления среды от направления напряженности электрического поля световой волны (рис.11). Световая волна в анизотропном веществе распадается на две волны - с взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации света. Напомню из курса физики, что поляризация света есть упорядоченность в ориентации векторов напряженности электрического и магнитного полей световой волны в плоскости, перпендикулярной световому лучу (достигается с помощью призм).

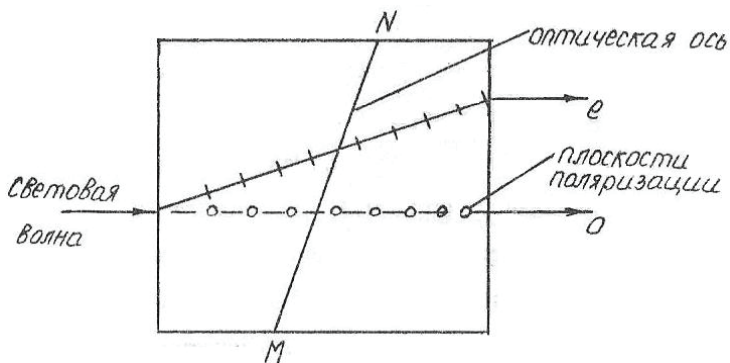


Рис.11. Схема двойного лучепреломления:
o - обыкновенный луч; e - необыкновенный луч

Метод заключается в просвечивании прозрачной модели из оптически активного материала (метилметакрилат) поляризованным светом (рис.11). Приложение нагрузки приводит к деформации модели, и в местах концентрации напряжений при прохождении поляризованного света появляются разноцветные полосы.

Форма и количество полос на экране 8 (рис.12) характеризуют напряженное состояние модели. По картине изохроматических полос (набор полос одного цвета) определяют степень концентрации напряжений.

Важно, что картины изохроматических полос тесно коррелированы с величиной остаточных деформаций. Создав ряд эталонных картин, соответствующих различным величинам остаточных деформаций, можно диагностировать наступление предразрушающей стадии.

Метод оптически активных покрытий (фотоупругого отражения)

В этом методе предусмотрено, что на поверхность конструкции наклеивают тонкий слой оптически активного (способного вызывать вращение плоскости поляризации проходящего плоско поляризованного света) материала с помощью специальных клеев, обладающих способностью отражать свет вследствие образования зеркальной поверхности под оптически активным материалом. При отражении поляризованного света от поверхности

появляется картина полос, которую можно видеть непосредственно на покрытии, а не на экране, как в предыдущем методе.

Метод предназначен для использования в полевых условиях. Он может быть реализован не только с монохроматическим (одной частоты), но и с обычным светом. Анализ проводят по картинкам цветных изохроматических полос.

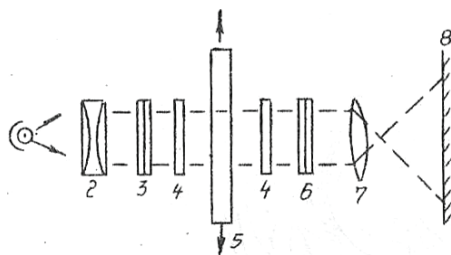


Рис.12. Схема установки для исследования концентраций напряжений методом фотоупругости:

1 - источник света; 2 - конденсор; 3 - поляризатор; 4 - четвертьволновые пластинки; 5- исследуемая модель; 6- анализатор; 7- фокусирующая линза; 8- экран или фотопластинка для получения изображения.

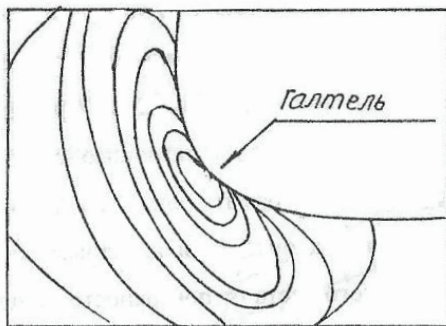


Рис.13. Картина изохроматических полос, иллюстрирующая концентрацию напряжений в галтелях

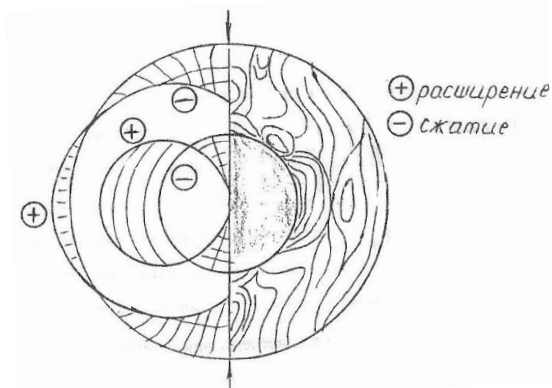


Рис.14. Схема распределения напряжений (+ -) и картина полос на границе раздела детали и фотоупругого покрытия

Нередко цвет полосы в заданной точке может быть использован для качественной оценки уровня напряжений в этой точке (рис.14).

Метод муаровых полос также весьма перспективен для оценки напряженности конструкций. Муаровые полосы возникают при наложении решеток в виде систем параллельных штрихов. Если, например, сделать контактный отпечаток такой решетки на фотоматериале с прозрачной подложкой и наложить его на исходный оригинал так, чтобы штрихи оригинала и отпечатка пересекались под малым углом, то возникает система темных и светлых полос, практически прямолинейных и перпендикулярных биссектрисе угла между штрихами решеток (рис.15). Если решетки неидеальны, т.е. их штрихи не вполне прямолинейны или расстояния между ними не постоянны, муаровые полосы деформируются. Таким образом, искажение муаровых полос напрямую связано с геометрическими искажениями поверхности объекта.

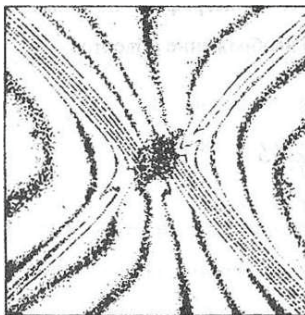


Рис.15. Муаровый эффект в зоне дефекта

Для этих целей используются специальные сетки, одна из которых наносится на поверхность объекта, а вторая (эталонная) с точно такой же ориентацией линий-штрихов - на лист прозрачного материала. В дальнейшем, анализируя картину интерференции муаровых полос, можно по разности смещений «узлов» довольно точно оценивать напряженность авиаконструкций, длительное время работавших в условиях эксплуатационного нагружения.

Лекция 3. Закономерности развития трещин в процессе работы авиаконструкций [3]

Материал данной лекции взят и читается студентам на основе раздела 1.3. Появление и развитие трещин при работе металлических конструкций учебного пособия «Диагностика повреждаемости авиационных конструкций» авторов В.А.Пивоварова, С.Г.Хрустикова, В.А.Короткова. Ниже приводятся выдержки из текста пособия.

В последнее время большинство исследований посвящено кинетике разрушения авиационных конструкций из-за развития трещин, что связано с возможностью учета живучести конструкций, а именно их функционированием с наличием видимых повреждений.

Этими вопросами занимается наука "механика разрушения", которая возникла на базе общей теории упругости. Механика разрушения изучает

условия зарождения, закономерности развития трещин, а также вопросы совершенствования расчетных методов обеспечения долговечности конструкций, находящихся в начальных стадиях разрушения.

Однако, специалистов по эксплуатации АТ интересует лишь часть вопросов, рассматриваемых механикой разрушения, а именно: как остаточный ресурс элемента конструкции зависит от размера трещины, какова предельная длина трещины в реальных условиях работы конструкции, с какой периодичностью необходимо проводить контроль элементов конструкции. Прежде чем ответить на эти вопросы, необходимо сформировать представление о степени опасности трещин.

Отправной точкой в изучении закономерностей разрушения конструкций следует считать работы русского ученого Г. В. Колосова (1909 г.) и английского ученого К. Инглиса (1913 г.) о наличии пиковых напряжений по краям овальных отверстий в напряженной пластине (рис. 16).

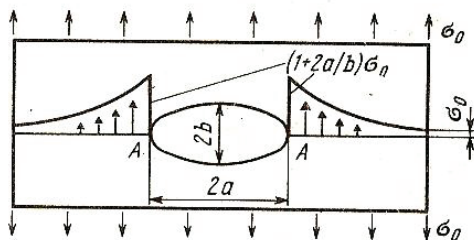


Рис. 16. Графическая интерпретация концентрации напряжений Колосова- Инглиса в пластине с эллиптическим отверстием

Еще одно направление в механике разрушения связывают с именем английского ученого из Авиационного исследовательского центра в Фарнборо А. Гриффитса (1893 - 1963 г.г.). Заслуга ученого состоит в том, что он связал причины развития трещин с процессами накопления и освобождения энергии деформации.

В 1921 г. Гриффитс доказал, что концентрация напряжений в дефекте, установленная Колосовым - Инглисом, позволяет превращать энергию

деформирования в энергию разрушения и что разрушение возможно только при постоянном подводе энергии. Классическая концепция хрупкого разрушения Гриффитса долгое время оставалась вне сферы практического применения, так как в реальных условиях работы разрушению металла сопутствуют такие явления, как текучесть, вязкость, ползучесть, что не учитывалось Гриффитсом в своих опытах.

Следующий значительный шаг в становлении механики разрушения связан с экспериментальными исследованиями английского ученого Дж. Ирвина (1948 г.) и венгерского ученого Е. Орована (1950 г.), предложившими использовать теорию Гриффитса для разрушения пластичных металлов с учетом понятия упругой энергии, затрачиваемой на развитие пластических деформаций вблизи трещины. В результате опыта была сформулирована концепция вязкости разрушения как критерия разрушения нагруженных и поврежденных конструкций. Эта концепция позволяет выделить целую группу так называемых безопасных трещин.

Итак, очевидно, что существует определенная связь между нагрузкой и длиной трещины. Выявление такой связи обусловлено положением, что разрушение требует определенных затрат энергии (это положение Гриффитса обосновал в своей статье "Явление разрушения и течение твердого тела", опубликованной им в феврале 1920 г.). Роль энергии в процессе хрупкого разрушения по Гриффитсу в следующем: концентрация напряжений у вершины трещины есть необходимое, но недостаточное условие развития трещины, нужно еще обеспечить подвод достаточной энергии к ее вершине. Поясним на примере.

Возьмем прямоугольную пластину, растянем ее напряжением σ и жестко закрепим ее края (рис. 17). Длину и ширину пластины считаем большими по сравнению с толщиной, которую для удобства принимаем равной единице: $a \gg 1$, $b \gg 1$. Определим энергию упругой деформации, запасенной в такой пластине. Для этого еще раз обратимся к типичной кривой деформирования (рис. 17, справа).

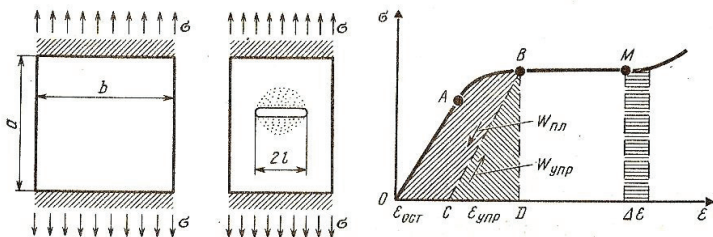


Рис. 17. Схема образования трещины в предварительно напряженной пластине.

Если в некоторый момент, соответствующий точке M , под действием силы $F = A\sigma$ удлинение $l\epsilon$ увеличивается на $\Delta l\epsilon$, то совершается дополнительная работа $\sigma A \Delta l \epsilon = \sigma \Delta \epsilon V$ (V - объем образца) и на столько же увеличивается энергия деформации. Следовательно, приращение энергии в единице объема $\Delta W = \sigma \Delta \epsilon$. Это приращение изображено заштрихованной площадью столбика с основанием $\Delta \epsilon$. Таким образом, если, например, при нагружении образца возникшая деформация соответствует деформации в точке B , то произведенная на единицу объема работа W равна площади фигуры $OBД$. Она состоит из обратимой упругой энергии, равной площади треугольника $BCД$ и необратимой работы пластических деформаций, изображаемой площадью OBC . Для линейно-упругого материала, подчиняющегося закону Гука $\sigma = E\epsilon$, удельная упругая энергия выглядит так

$$W = 0.5\sigma\epsilon = 0.5E\epsilon^2 = 0.5\sigma^2/E, \quad (14)$$

поскольку геометрически это есть площадь прямоугольного треугольника с катетами BD и CD .

В закрепленной пластине (см. рис. 17) запасена энергия упругой деформации $W_0 = \sigma^2/(2Eab)$, в пересчете на единицу площади с энергией $\sigma^2/(2E)$.

Пусть в пластине появилась трещина малой длины l . Эта трещина приведет к уменьшению деформаций в прилегающей зоне (на рис. 17 зона отмечена точками). Площадь зоны пропорциональна l^2 . Таким образом,

освобожденная трещиной упругая энергия равна:

$$W = W_0 - C \frac{\sigma^2}{2E} l^2. \quad (15)$$

Константу C , учитывающую неопределенность формы прилегающей к трещине зоны, Гриффитс определил из решения Колосова - Инглиса (см. рис. 16). Оказалось, что $C = 2\pi$, тогда $W = W_0 - \pi\sigma^2 l^2/E$. (16)

Освобожденная упругая энергия затрачивается на разрушение, т. е. на образование новой поверхности тела. Если считать l - удельную работу разрушения на единицу площади новой поверхности тела - постоянной материала, то работа, затрачиваемая на образование трещины длиной $2l$,

$$G = 4\gamma l. \quad (17)$$

Итак, энергия, затрачиваемая на рост трещины, возрастает пропорционально l , а высвобождаемая энергия деформации возрастает пропорционально l^2 . Это показано графически на рис. 18, где A - соответствует изменению энергии, затрачиваемой на рост трещины в зависимости от ее длины, а кривая B - высвобождающейся при этом энергии, накопленной при деформировании. Кривая C представляет собой алгебраическую сумму указанных двух энергий и характеризует энергетический баланс.

Вплоть до точки X в системе в целом преобладает поглощение энергии, за точкой X энергия начинает высвобождаться. Из этого следует, что существует некоторая критическая длина трещины $l_{кр}$. Трещины, длина которых меньше $l_{кр}$, как правило, не растут и являются безопасными; трещины, длина которых больше $l_{кр}$ при заданном напряжении распространяются самопроизвольно и на практике весьма опасны. Подчеркнем, что если в конструкции имеется трещина с $l < l_{кр}$, то, несмотря на высокую концентрацию напряжений в вершине трещины (даже превышающими прочность материала при растяжении), конструкция будет сохранять работоспособность. Не приводя подробного доказательства, которое можно найти, например, в работе [5], запишем выражение для $l_{кр}$ таким образом

$$l_{кр} = 2E\gamma / (\pi\sigma^2). \quad (18)$$

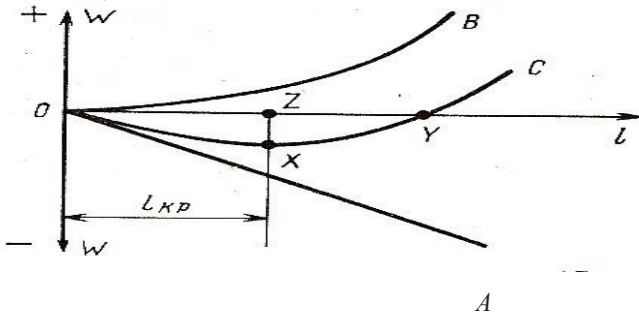


Рис. 18. Энергетическая модель разрушения по Гриффитсу

Заметим, что длина безопасной трещины обратно пропорциональна податливости - способности материала к упругому деформированию. В общем случае, чем больше податливость материала, тем меньше длина безопасной трещины. Например, резина при деформации запасает довольно много энергии, однако ее работа разрушения очень мала. Поэтому критическая длина трещины у растянутой резины невелика (для того, чтобы надутый воздушный шар мгновенно лопнул, достаточно наколоть его иголкой).

Таким образом, процесс разрушения складывается из двух стадий - зарождения трещины и ее развития, причем каждая из этих стадий подчиняется своим законам и характеризуется своими критериями.

К основным критериям развития трещин в деформируемых металлах и сплавах относятся критерии интенсивности и вязкости разрушения K_C и K_{IC} . Когда трещина развивается, то в более или менее обширной окрестности ее острия всегда происходят необратимые пластические деформации материала.

Учеными Орованом и Ирвином разработана концепция т.н. квазихрупкого разрушения, которая позволила перейти от идеального материала в схеме Гриффитса к реальным металлам и сплавам. Сущность этой концепции состоит в предположении, что затраты энергии в процессе создания

новых поверхностей при развитии трещины связаны главным образом с работой пластической деформации объемов материалов, расположенных перед фронтом трещины. Доля потока энергии, идущего в вершину трещины, зависит от коэффициента интенсивности напряжения K_C , который определяют по экспериментальным зависимостям, учитывающим внешние нагрузки и геометрические размеры тела.

При достаточно большой трещине пластины коэффициент интенсивности напряжений (рис. 19) принимает свои минимальные значения и перестает зависеть от толщины пластины. Это минимальное значение K_C обычно обозначают K_{IC} , оно характеризует вязкость разрушения и называется критическим коэффициентом интенсивности напряжений.

Таким образом, вязкость разрушения – определяемый экспериментально показатель материала, соответствующий критическому значению напряжения в вершине трещины, когда запасенной энергии деформации достаточно для распространения трещины. Величина K_{IC} зависит не только от толщины, но и от размера, формы трещины и типа нагружения (рис. 20). Критическая длина сквозной трещины равна 10 мм, а несквозной дискообразной трещины - 23 мм.

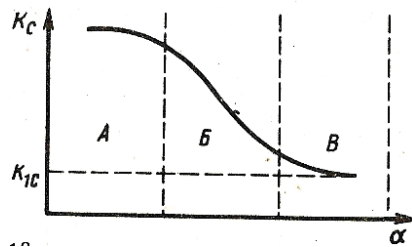


Рис. 19. Изменение коэффициента K_C от толщины пластины: A- тонкие пластины; B – пластины средней толщины; V – толстые пластины

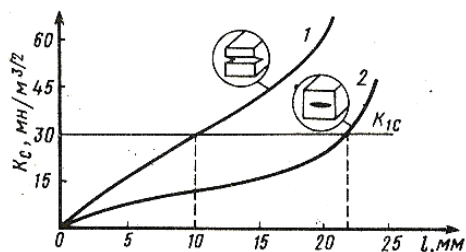


Рис. 20. Зависимость критической длины трещины от ее формы: 1 – сквозная трещина; 2 – трещина ограниченных размеров

Заметим, что вязкость разрушения зависит и от уровня накопленных повреждений, что, конечно, влияет на достоверность экспериментальных методов по определению $l_{кр}$, осуществляемых на стадии проектирования и изготовления авиационных конструкций. К тому же, чем меньше длина трещины, тем существеннее различие между экспериментальными данными и теоретическими расчетами из-за увеличения роли пластических деформаций в вершине трещины (когда длина трещины и зона пластического деформирования приближаются к равным величинам). Тем не менее экспериментальным оценкам в проблеме обеспечения трещиностойкости конструкции пока нет альтернативы.

Для экспериментальной оценки K_{Ic} обычно используют стандартные образцы с искусственно выращенной усталостной трещиной. Раскрытие трещины определяют с помощью тензорезистора, а коэффициент интенсивности напряжений рассчитывают по соответствующим формулам.

РАЗДЕЛ II.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Тексты лекций данного раздела сформированы и основаны на материале учебного пособия автора «Диагностика авиационной техники (информационные основы)» 2007 г. издания [1].

Лекция 4. Задачи технической диагностики. Основные понятия и термины [10]

Основные понятия и термины

Техническая диагностика базируется на ряде специфических терминов и понятий, установленных государственными стандартами (ГОСТ 26656-85 [11], ГОСТ 20911-89 [12]) . Ниже приведены данные согласно ГОСТам, ОСТам, СП, а также взятые в справочной и учебной литературе [13]. Выборочно остановимся на основных терминах.

Техническое состояние – совокупность свойств объекта, подверженных изменению в процессе эксплуатации, характеризующихся в определенный момент времени заданным требованиям и признаками, установленными НТД.

Объект диагностики – изделие или его составная часть, являющаяся предметом выполнения работ в процессе диагностирования.

Диагностирование – процесс определения вида технического состояния объекта, системы.

Диагностический признак – индивидуальная характеристика состояния или развития объекта, процесса, характеризующая его свойство, качество.

Диагностический параметр - оцифрованная физическая величина, отражающая техническое состояние объекта и характеризующая какое-либо свойство объекта в процессе его диагностирования.

Критерий – (от греч. kriterion) признак, на основании которого производится оценка, определение или классификация чего-либо; мерило оценки.

Неисправность (неисправное состояние) – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований, установленных НТД.

Исправность (исправное состояние) – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным НТД.

Работоспособное состояние (работоспособность) – состояние объекта, изделия, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах установленных НТД.

Неработоспособное состояние (неработоспособность) – состояние объекта, изделия, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям НТД.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта диагностики.

Дефект – каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным НТД.

Контролепригодность – свойство, характеризующее приспособленность объекта к проведению его контроля заданными методами и средствами технической диагностики.

Программа диагностирования – совокупность алгоритмов диагностики, выстроенных в определенной последовательности.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение определенного времени или наработки.

Надежность – свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, режимов хранения и транспортирования.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе ТО и Р.

Прогнозирование – процесс определения технического состояния объекта контроля на предстоящий период времени в определенном интервале.

Наработка – время эксплуатации объекта (в часах, посадках, циклах, годах).

Априори - (от лат. a priori - из предшествующего) понятие логики и теории познания, характеризующее знание, предшествующее опыту и независимое от него.

Диссипация – (от лат. dissipatio рассеивание) - 1) для энергии - переход энергии упорядоченного движения (например, энергии электрического тока) в энергию хаотического движения частиц (теплоту); 2) для атмосферы - постепенное улетучивание газов атмосферы (земли, других планет и космических тел) в окружающее космическое пространство.

Ресурс – продолжительность эксплуатации объекта (в часах, посадках, циклах).

Неразрушающий контроль – контроль качества продукции, изделия, объекта, который должен не нарушать пригодности для использования по назначению.

Метод контроля – совокупность правил применения определенных принципов для осуществления контроля.

Способ контроля – совокупность правил применения определенных видов осуществления методов контроля.

Средство контроля – изделие (прибор, дефектоскоп) или материал, применяемые для осуществления контроля с учетом разновидностей способов, методов контроля.

Автоматизированная система диагностики – система диагностики, в которой процедуры диагностирования осуществляются с частичным непосредственным участием человека.

Автоматическая система диагностики – система диагностики, в которой процедуры диагностирования осуществляются без непосредственного участия человека.

Трибодиагностика – (от лат. tribus, tribuo – делить, распределять) область диагностики, занимающаяся определением технического состояния трущихся деталей на основе анализа продуктов износа в смазочном масле.

Основные направления технической диагностики

Техническая диагностика изучает методы получения и оценки диагностической информации, диагностические модели и алгоритмы принятия решений. Техническим диагностированием называется процесс определения технического состояния объекта с определенной точностью. Целью технической диагностики является эффективная организация процессов диагностирования АТ при изготовлении, эксплуатации, ремонте и хранении, а также повышение ее надежности и ресурса при качественном техническом обслуживании (ТО), безопасной и надежной эксплуатации.

При диагностировании определяется состояние объекта в данный момент времени, на предстоящий и прошедший периоды работы.

Планер, двигатель, функциональные системы АТ подвержены непрерывным, качественным изменениям. Направление этих изменений предопределяется вторым законом термодинамики, который утверждает, что упорядоченные системы (к ним относятся все технические устройства) имеют тенденцию самопроизвольно разрушаться со временем, т.е. утрачивать упорядоченность, заложенную в них при создании. Эта тенденция проявляется при совместном действии многочисленных дезорганизационных факторов, которые не могут быть учтены при проектировании и изготовлении АТ, поэтому процессы изменения качества кажутся нерегулярными, случайными, а их последствия - неожиданными.

При эксплуатации АТ по фактическому техническому состоянию [14] важно обеспечить необходимую эффективность технического обслуживания. Для этой цели служит *ранняя диагностика*, позволяющая обнаружить неисправности АТ с упреждением в такой стадии их развития, которая допускает хоть и ограниченное, но безопасное продолжение эксплуатации. Благодаря раннему обнаружению дефектов и неисправностей техническая диагностика позволяет устранить отказы в процессе ТО, что повышает надежность и эффективность эксплуатации АТ. Это означает, что диагностика совершенствуясь и развиваясь перерастает в *прогнозирование* состояний АТ,

являющееся одним из направлений области технической диагностики. Здесь решения должны основываться на моделях отказов, изучаемых в теории надежности. При прогнозировании очень важен выбор вида модели и ее обоснование, так как прогноз, осуществляемый по разным моделям, дает существенно различные результаты [15]. Следует отметить, что прогнозирование с использованием диагностических моделей может осуществляться не только путем экстраполяции, но и в направлении уменьшения наработки - интерполированием. Такое предсказание прошедшего состояния называется *генезом*. Генез необходим при оценке состояния объекта, предшествовавшего отказу.

Таким образом, подводя черту под вышесказанным, следует акцентировать внимание на трех основных направлениях, вокруг которых и базируются представления о классических и прикладных задачах в области теоретической и практической диагностики, ее информационные составляющие - *генез, диагноз, прогноз*.

Задачи технической диагностики

Техническая диагностика АТ решает обширный круг задач, но основной - является распознавание состояний технических систем в условиях ограниченной информации. Решение диагностических задач (отнесение объекта к исправному или неисправному состоянию) всегда связано с риском ложной тревоги или пропуска дефекта.

Следует отметить, что угрожающие при своем развитии разрушением объектов АТ неисправности можно укрупнено разделить на три группы [16]:

1) неисправности очень быстро (в течение долей секунды или нескольких секунд) переходящие в аварию, или, что почти то же самое, неисправности, слишком поздно обнаруживаемые с помощью доступных средств диагностики;

2) неисправности, способные развиваться в аварию в течение нескольких минут, а также неисправности, характер и темп развития которых

нельзя достоверно предсказать на основе достигнутого уровня знаний. Возникновение подобных неисправностей должно сопровождаться немедленной выдачей сигнала экипажу самолета (или персоналу испытательного стенда) для привлечения внимания, оценки ситуации и принятия необходимых мер;

3) неисправности, развивающиеся относительно медленно или обнаруживаемые наличными диагностическими средствами на столь ранней стадии, что переход их в аварию в продолжение данного полета можно считать практически исключенным. Раннее обнаружение именно таких неисправностей и составляет основу прогнозирования состояний АТ.

Интервал времени от появления первого симптома неисправности до опасного ее развития является не столько физическим свойством конкретной неисправности, сколько мерилom уровня наших познаний о ее причинах, признаках и процессах развития.

Одна из практических задач исследований диагностики в области динамики развития неисправностей АТ состоит в том, чтобы максимально сокращать число неисправностей первой и второй групп и постепенно «переводить» их в третью, расширяя, таким образом, возможности раннего диагностирования и долгосрочного прогнозирования состояний АТ. Высокая степень упреждения диагноза не только повышает безопасность полетов (БП), но и способствует существенному снижению эксплуатационных затрат, связанных с нарушением регулярности полетов, ремонтом АТ.

Опыт эксплуатации АТ для решения задач диагностики показывает, чтобы правильно поставить диагноз, необходимо на первом этапе заранее знать все возможные состояния, исходя из априорных статистических данных и вероятностей проявления ситуаций, а также массив диагностических признаков, реагирующих на эти состояния. Как уже отмечалось, процесс качественного изменения технических свойств АТ происходит непрерывно, а это значит, что множество возможных ее состояний бесконечно и даже несчетно. Одна из задач диагностики состоит в том, чтобы разбить множество

состояний на конечное и небольшое число классов. В каждом классе объединяются состояния, обладающие одинаковыми свойствами, выбранными в качестве признаков классификации. При этом статистическая база параметров, полученных перечисленными выше методами диагностики, должна быть непредвзятой и реальной.

Не все параметры, которые могут быть использованы в диагностике, равноценны по содержательности сведений о функционирующих системах АТ. Одни из них приносят информацию сразу о многих свойствах работающих модулей, другие, напротив, крайне бедны. Безусловно, предпочтение следует отдавать диагностическим параметрам, носящим флуктуирующий характер, а не тем, которые постоянны или меняются очень медленно [15]. Например, шум авиадвигателя и его вибрация по количеству привносимой информации имеют большое преимущество перед такими устойчивыми инертными сигналами, как температура охлаждающей жидкости, скорость вращения вала и др., хотя эти параметры так же как шум и вибрация зависят от состояния работающего авиадвигателя. Поэтому на втором этапе интересным представляется рассмотреть задачи взаимосвязи диагностических параметров, их изменение и возможное влияние друг на друга, а также оценить значимость признаков разных функциональных параметров АТ.

Известно, что теория постановки диагноза довольно хорошо описывается общей теорией связи, являющейся одним из разделов теории управления [17]. На службу диагностике можно поставить математический и логический аппараты, систему освоенных понятий и терминологию. Необходимо лишь найти физическую интерпретацию абстрактных формул и пути практического осуществления предписываемых ими подходов. Таким образом, на третьем этапе необходимо подтвердить, воспользовавшись известными принципами информационной теории, значимость диагностических признаков, и с учетом этого сформировать диагноз, а в дальнейшем, осуществить прогноз предотказных состояний. Эта часть работы связана с наибольшими трудностями, т.к. функциональные системы АТ

являются многопараметрическими, но не все параметры одинаково существенны (информативны) в тех или иных конкретных условиях.

Обратимся к классической трактовке структурирования диагностики по Биргеру И.А. лишь с некоторым дополнением этой схемы (рис.21) [15].

Представленная укрупненная структура характеризуется двумя взаимосвязанными направлениями: теорией распознавания и теорией информативности. Теория распознавания дополнена некоторыми элементами классификации и включает в себя разделы, связанные с построением алгоритмов распознавания, решающих правил при идентификации объектов контроля и диагностических моделей и их классификацию.

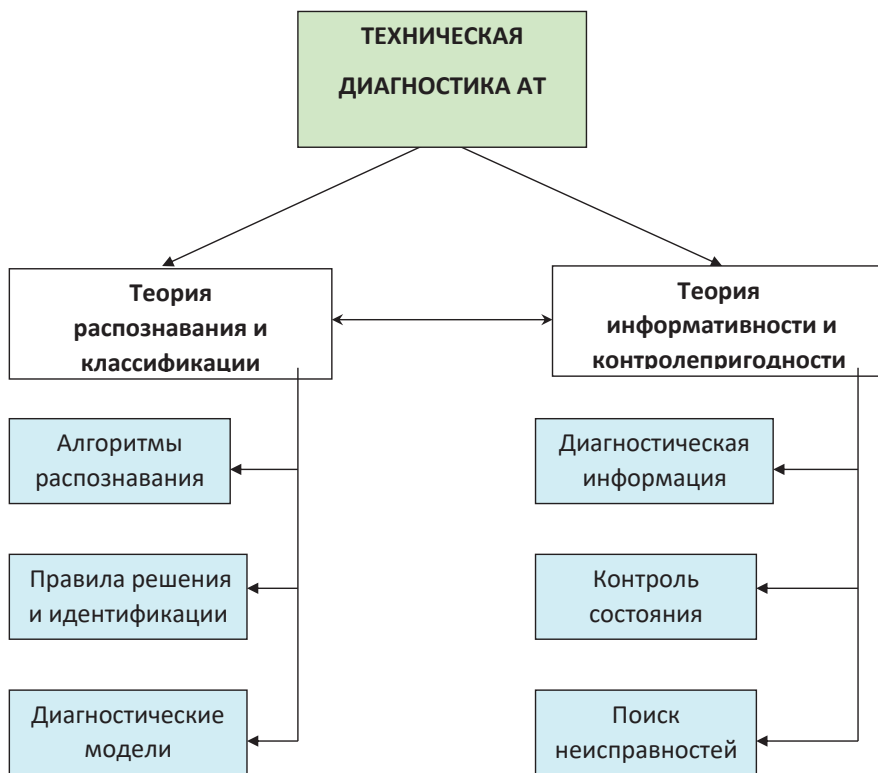


Рис. 21. Структура технической диагностики

Теория информативности в данном контексте подразумевает получение диагностической информации с помощью известных методов и средств диагностики, автоматизированный контроль с разработкой алгоритмов поиска неисправностей, минимизацию процесса установления диагноза.

Еще один круг задач в области технической диагностики связан с непрерывным внедрением систем диагностирования в практику эксплуатационных предприятий ГА. Условием для их внедрения является наличие специальных методик и программ диагностирования, а также алгоритмов принятия решений по дальнейшей эксплуатации АТ. При этом необходимыми условиями являются наличие современного приборного, метрологически аттестованного оборудования и кадров соответствующего уровня квалификации.

Лекция 5. Энтропийные модели распознавания состояний АТ. Диагностическая ценность признаков [1]

Энтропия и диагностическая информация

В основе оценки любой информации лежит понятие *энтропия*, которое характеризует упорядоченность и изменчивость окружающего нас материального мира вообще и материальных объектов в частности. В статистической теории открытых систем [18] энтропия является одной из важнейших характеристик и может играть три разных роли: служит мерой неопределенности при статистическом описании; мерой относительной степени упорядоченности неравновесных состояний открытых систем; мерой разнообразия в информационном потоке.

На разных этапах развития статистической теории и теории информации были предложены отличающиеся по форме и степени обобщенности определения энтропии.

Впервые связь введенной ранее в термодинамике энтропии с функцией распределения координат и импульсов частиц $f(r,p,t)$ (состояния вещества) была установлена Л.Больцманом на примере разреженного газа $f(x,t)$:

$$S_b = -\kappa \cdot n \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,t) \cdot \ln f(x,t) dx + S_0 . \quad (19)$$

Значение константы S_0 зависит от выбора размера ячейки в фазовом пространстве $x=(r,p)$, однако это значение не играет роли, поскольку для всех приведенных ниже критериев используют разность энтропий двух различных состояний.

Теперь рассмотрим n -мерное фазовое пространство

$$x=(r_1, \dots, r_n; p_1, \dots, p_n). \quad (20)$$

Введем функцию распределения в n -мерном фазовом пространстве $f_n(x,t)$. Через эту функцию выражается энтропия Гиббса:

$$S_g = -k \int_{-\infty}^{+\infty} f_n(x,t) \cdot \ln f_n(x,t) dx + S_0 . \quad (21)$$

Константу S_0 можно выбрать таким образом, чтобы в отсутствии корреляций, когда распределение $f_n(x,t)$ выражается через произведения распределений отдельных частиц, энтропии Больцмана и Гиббса совпадали: $S_b=S_g$. Естественно, что выражение (19) является общим, чем выражение (21), так как оно справедливо и при наличии корреляций координат и импульсов частиц. При учете корреляций равенство $S_b=S_g$ нарушается и заменяется неравенством $S_b \leq S_g$.

Энтропии Больцмана и Гиббса были введены при статистическом описании систем частиц, когда микроскопическое состояние характеризуется набором пар сопряженных координат и импульсов частиц системы [19]. Определение энтропии через средние значения функции распределения энтропии более значимо, так как выражения такого типа обладают совокупностью свойств, которые позволяют

использовать их в качестве меры неопределенности при статистическом описании. На это и обратил внимание американский ученый Клод Шеннон.

Одной из задач, которую ставил перед собой Шеннон, заключалась в том, чтобы определить систему кодирования, позволяющую оптимизировать скорость и достоверность передачи вторичной информации.

Для решения этой задачи К. Шеннон использовал математический аппарат, созданный еще в 1928 году Р. Хартли в его работе «Передача информации». Именно Р. Хартли ввел в теорию передачи информации методологию "измерения количества информации", которая представляет собой «группу физических символов – слов, точек, тире и т.п., имеющих по общему соглашению известный смысл для корреспондирующих сторон» [17].

Таким образом, ставилась задача ввести какую-то меру для измерения кодированной информации, а точнее последовательности символов, используемых для кодирования вторичной информации.

Рассматривая передаваемую информацию в виде определенной последовательности символов, например, алфавита, а передачу и прием этой информации в виде последовательной выборки из этого алфавита, Р. Хартли ввел понятие количества информации в виде логарифма числа, общего количества возможной последовательности символов (алфавита), а единицей измерения этой информации определил – основание этого логарифма. Тогда, например, в телеграфии, где длина алфавита равна двум (точка, тире), при основании логарифма 2, количество информации, приходящееся на один символ равно

$$H = \log_2 2 = 1 \text{ бит (1 двоичная ед.)}. \quad (22)$$

Аналогично при длине алфавита 32 буквы: $H = \log_2 32 = 5$ бит (5 двоичных единиц).

Клод Шеннон, используя методологию Р. Хартли, обратил внимание на то, что при передаче речевых сообщений частота использования различных букв алфавита не одинакова: некоторые буквы используются очень часто, другие - редко. Существует и определенная корреляция в буквенных

последовательностях, когда за появлением одной из букв с большой вероятностью следует конкретная другая. Введя в формулу Р. Хартли указанные вероятностные значения p , К. Шеннон получил новые выражения для определения количества информации. Для одного символа это выражение приобретает вид:

$$H = -p \log_2 p, \quad (23)$$

а сообщения, состоящего из "n" символов:

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i. \quad (24)$$

Выражение (24), повторяющее по форме выражение для энтропии в статистической механике, К. Шеннон по аналогии назвал *энтропией*.

Такой подход принципиально изменил понятие информации. Под информацией теперь стали понимать не любые сообщения, передаваемые в системе связи, а лишь те, которые уменьшают неопределенность у получателя информации об объекте, и чем больше уменьшается эта неопределенность, т.е. чем больше снижается энтропия сообщения, тем выше информативность поступившего сообщения. Энтропия - это тот минимум информации, который необходимо получить, чтобы ликвидировать неопределенность алфавита, используемого источником информации.

Форма информации (структура, модуляция физических полей), которая и несет смысловое содержание этой информации, реализуя его через информационное взаимодействие материи, является вторичной информацией.

Легко понять, что смысловое содержание вторичной информации в человеческом обществе – это знание об окружающем нас мире, определяющее поведение человека, т.к. опираясь на эти знания, человек взаимодействует с природой и материальными объектами.

Вторичная информация существует объективно, независимо от воли и сознания людей. Вторичная информация, например, может проявляться в виде электромагнитного, гравитационного полей, фиксируемых органолептическими чувствами человека.

Человек воспринимает мир через образы, но, анализируя увиденное, мыслит словами. Это означает, что в нашей памяти одновременно хранится образная вторичная информация об окружающем нас мире в своем естественном голографическом виде и перекодированная вторичная информация в символике нашего языка. Каждый человек постоянно занимается кодированием и перекодированием, наблюдая окружающий мир. При этом информацию символов, хранящуюся в памяти, можно анализировать количественно по Э.Хартли или К.Шеннону, используя одинаковый алфавит и двоичную систему счисления. Настоящая информация действительно не измеряется, т.к. отсутствуют эталоны сравнения. Однако ее можно классифицировать и определить более значимую составляющую для постановки диагноза.

Среди систем, которые могут обмениваться энергией, выделяется значимый класс особых систем, движение в которых можно рассматривать как броуновское. В таких системах разность свободных энергий $F(t)$ и F_0 (где индекс "0" относится к равновесной характеристике) определяется выражением:

$$L_F = F(t) - F_0 = kT \int_{-\infty}^{+\infty} f(v, t) \cdot \ln(f/f_0) dv \geq 0, \quad (25)$$

которое представляет пример т.н. энтропии Кульбака.

Динамическое и статическое описание сложных движений

Сложные движения в динамике первоначально были обнаружены в гамильтоновых системах. Для их характеристики и было введено понятие "динамический хаос". В настоящее время этот термин широко используется и для сложных движений в диссипативных динамических системах. Основной особенностью динамического хаоса является динамическая неустойчивость движения - экспоненциальная расходимость близких в начальный момент времени траекторий, вследствие чего имеется высокая чувствительность к изменению начальных условий. Мерой экспоненциальной расходимости

служит К-энтропия (энтропия Крылова-Колмогорова-Синая) [1]. К-энтропия связана со средней скоростью расхождения близких в начальный момент траекторий и, следовательно, с показателями Ляпунова. К-энтропия выражается через положительные показатели Ляпунова по формуле

$$K = \sum_i \lambda_i (\lambda_i > 0) . \quad (26)$$

Таким образом, К-энтропия равна нулю, если нет положительных показателей Ляпунова. К-энтропия является критерием динамической неустойчивости движения.

Оценка значимости и ценности информации в практических задачах диагностики

В теоретико-информационных исследованиях [20, 21, 22] можно выделить два подхода к определению понятия ценной (полезной) информации, т.е. информации, которая помогает достижению цели. Если вероятность достижения цели велика, то ценность информации определяется по критерию минимизации затрат на ее получение. Если же достижение цели маловероятно, то мерой ценности (полезности) информации может служить некая функция отношения вероятности достижения цели после и до получения информации [1].

Информация, получаемая системой контроля B о объекте A , характеризует его состояние. Следовательно, если поставить целью диагностирования получение информации ко времени возможного отказа объекта, то полученный информационный критерий может представлять собой обобщенный показатель остаточной работоспособности объекта. При этом важной задачей является выбор наиболее существенных диагностических параметров. Он может быть также осуществлен с помощью алгоритма логических связей, т.н. информационных оценок (см. рис.22).

Известно, что определенные симптомы и их комбинации адекватно характеризуют техническое состояние объекта диагностирования. Таким

образом, рассматривают две зависимые системы: технических состояний объекта и симптомов этих состояний (диагностических признаков).

Введем здесь ряд важных понятий. Будем называть *простым признаком* результат обследования, который может быть выражен одним из двух символов или двоичным числом (например, 1 и 0; «да» и «нет»; «+» и «-» и т.п.). С точки зрения теории информации простой признак можно рассматривать как систему, имеющую одно из двух возможных состояний. Для целей диагностики область возможных значений измеряемого параметра часто разбивается на интервалы, связанные с наработкой объекта, и характерным здесь является присутствие параметра в данном интервале. В связи с этим результат количественного выявления значений параметров может рассматриваться в совокупности с диагностическими признаками, принимающих сразу несколько возможных состояний.

Условимся называть *сложным признаком* (разряда m) результат наблюдения (обследования), который может быть выражен одним из m символов. Рассмотрим подробнее некоторые признаки.

Одноразрядный признак ($m=1$) имеет только одно возможное состояние. Такой признак не несет какой-либо диагностической информации и его следует исключить из рассмотрения.

Двухразрядный признак ($m=2$) обладает двумя возможными состояниями. Эти состояния альтернативны, так как реализуется только одно из них. Очевидно, что двухразрядный признак может быть заменен простым признаком, например, B_j .

Трехразрядный признак ($m=3$) имеет три возможных значения и т.д.

С учетом изложенного, обратимся теперь к теории информации. Пусть в процессе диагностирования наблюдают признаки B , т.е. определяют состояние системы A . Информация, которую при этом получают, уменьшает энтропию системы A , т.е.

$$J_A(B) = H(A) - H(A/B), \quad (27)$$

где $H(A/B)$ - полная условная энтропия системы A относительно системы B .

Эта информация характеризует степень неопределенности системы A , остающуюся после того, как система B полностью определилась.

В общем случае признак B_j m -го разряда имеет m возможных альтернативных значений $B_{1j}, B_{2j}, \dots, B_{mj}$. В инженерной практике обычно пользуются обследованием по двум, трехразрядным признакам, т.е. признакам, имеющим два-три возможных состояния. Обычно представляют признак 3-го разряда в виде комплекса простых альтернативных признаков. Если выявлено, что признак B имеет для данного состояния объекта значение B_{js} , то это значение называют реализацией признака B_j . В качестве диагностического веса реализации B_j для состояния A_i принимают величину

$$Z_{Ai}(B_{js}) = \log \left[\frac{P(B_{js}/A_i)}{P(B_{js})} \right], \quad (28)$$

где $P(B_{js}/A_i)$ - вероятность появления B_{js} реализации признака B для объектов, имеющих состояние A_i ; $P(B_{js})$ - вероятность появления значения B_{js} для всей совокупности исследуемых объектов.

Величину $Z_{Ai}(B_{js})$ называют *диагностическим весом реализации*. Ее считают также показателем ценности информации и информационной мерой признака. По формуле (28) рассчитывают диагностический вес реализаций двухразрядных параметров по двум возможным состояниям. Диагностической ценностью обследования по признаку B_j для состояния A_i считают величину информации, внесенную признаком B_j для определения состояния A_i . Для m - разрядного признака

$$Z_{Ai}(B_j) = \sum_{s=1}^m P(B_{js}/A_i) \cdot Z_{Ai}(B_{js}). \quad (29)$$

В частном случае диагностическая ценность обследования простого двухразрядного признака вычисляется по формуле (30):

$$Z_{Ai}(B_j) = 2 \cdot P\left(\frac{B_j}{A_i}\right) \cdot \log \left[\frac{P\left(\frac{B_j}{A_i}\right)}{P(B_j)} \right]. \quad (30)$$

Реализации одного и того же диагностического признака в общем случае не равнозначны по их вкладу в информацию о различных состояниях объекта. Диагностическая ценность обследования учитывает все возможные реализации признака и представляет собой математическое ожидание величины информации, вносимой отдельными реализациями. По формуле (30) определяют диагностическую ценность обследований для выбранных состояний. Диагностическая ценность обследований B_j для какого-либо одного состояния не показывает истинной общей диагностической ценности признака B_j для всего объекта. Обследование, обладающее небольшой ценностью для одного состояния, может иметь значительную ценность для другого. Поэтому вводят понятие общей диагностической ценности обследования по признаку B_j для всей диагностируемой совокупности состояний

$$Z_A(J_{B_j}) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot Z_{Ai}(B_j). \quad (31)$$

Величина $Z_A(J_{B_j})$ представляет собой ожидаемое (среднее) значение информации, которое может быть внесено обследованием в различные, заранее неизвестные диагнозы. Она может быть использована не только для оценки эффективности обследования, но и для целесообразности выбора величины диагностических интервалов (числа разрядов). Для определения общей диагностической ценности обследования используют формулу (31). При определении комбинации признаков, с помощью которых выбранная их совокупность была бы отнесена к одному из возможных состояний объекта, составляется алгоритм на основе формулы Байеса (32). Принцип метода Байеса подробно будет изложен в материале Лекции 7.

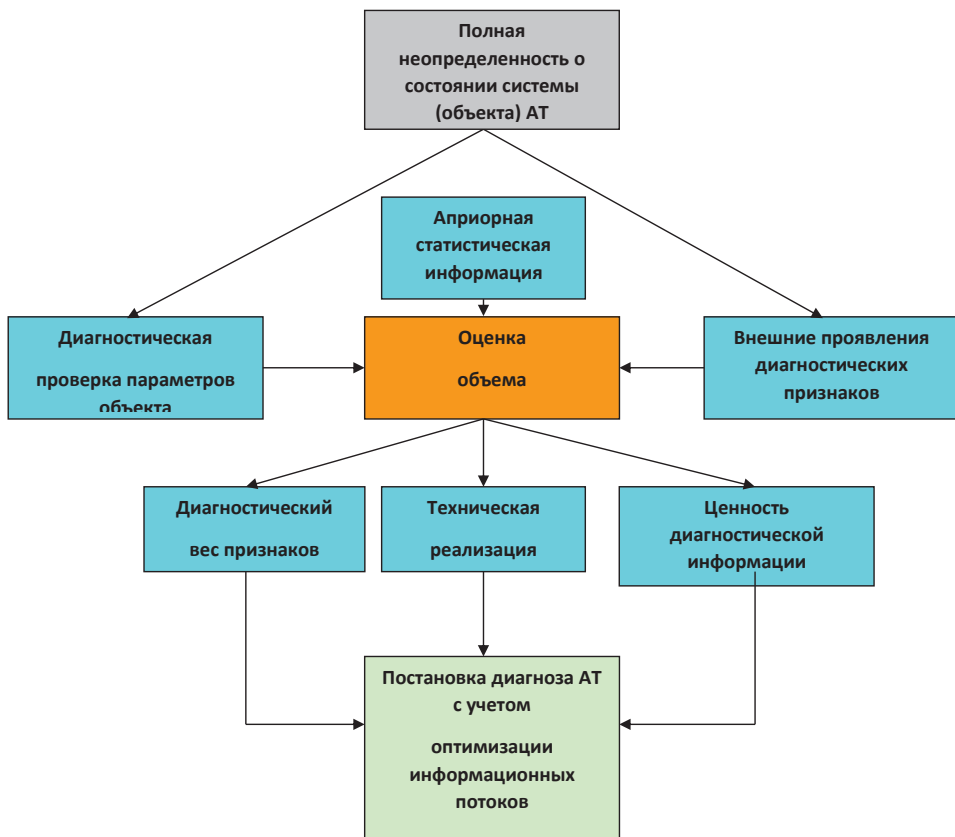


Рис.22. Информационная оценка процессов диагностирования АТ

$$P(A_i/B) = \frac{P(A_i) \cdot P(B/A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_s) \cdot P(B/A_s)}, \quad (32)$$

где $P(A_i/B)$ - вероятность состояния A_i при наличии комплекса признаков B ; $P(A_i)$ - априорная вероятность состояния A_i ; $P(B/A_i)$ - вероятность появления комплекса признаков B при состоянии объекта A_i .

Таким образом, устанавливается связь между определенным набором диагностических признаков и соответствующим этому набору состоянием

объекта (рис.22). Состояние объекта может определяться количеством информации, получаемой системой контроля в зависимости от смыслового назначения этой информации. Существенность параметров контроля также определяется по количеству информации, которое можно получить с их помощью. Ценность обследования определяется мерой вероятности данного состояния, а не вероятностью отказа, по контролируемому параметру.

Важно отметить следующее, что для реализации рассмотренных принципов необходимо разбить пространство возможных состояний элементов АТ на некоторую детерминированную совокупность, что представляет определенные трудности в силу непрерывности изменения их состояний и соответствующих параметров. Получение информации о состоянии объекта связано с событием, результат которого не был предопределен, и, чем более ожидаемым (вероятным) является событие, тем меньше информации мы получаем. Именно на таких рациональных представлениях о том, как уменьшается неопределенность при получении тех или иных сведений, базируются научные концепции информации и количественные (вероятностные) меры ее оценки.

Применение информационной энтропии К.Шеннона в задачах распознавания. Выбор критериев информативности

Из рассмотренных выше положений, научных воззрений теории информации, а также видов энтропии, характеризующей основополагающее свойство неопределенности сложных систем, можно выделить три группы энтропии и отнести их к следующим категориям (табл.1): *термодинамическая, статистическая и информационная энтропии.*

Как уже упоминалось выше, что для информационного описания двух разных процессов – статистических и динамических - необходимо два принципиально разных подхода. Однако в реальном мире, а не в мире моделей, строго разграничить эти два типа процессов невозможно, это разные способы описания одних и тех же физических объектов.

Необходимо различать функциональное и поведенческое описание открытой системы, взаимодействующей с внешним миром. При функциональном подходе изучают внутреннее устройство системы и выясняют, какие функции выполняют те или иные ее подсистемы, а при поведенческом - способы ее взаимодействия с внешним миром, закономерности ее реакций на те или иные внешние воздействия (тесты) [22].

В начале лекции уже упоминалось, что в теории связи используются два определения К. Шеннона понятия «информация». Одно из них совпадает с энтропией Больцмана и является фактически мерой неопределенности системы при статистическом описании. Второе выражается через разность значений безусловной и условной энтропии. Конкретизация второго определения позволяет ввести меру информации для систем АТ в зависимости от значений управляющих параметров.

Таблица 1.

Сравнительные характеристики различных энтропий

№ п/п	Виды энтропии		Пригодность для решения поставленных задач
	Наименование	Выражение	
1.	Классическая термодинамическая энтропия Р.Клаузиуса	$S = \Delta Q/T$	Возможно использовать только для оценки состояния вещества в разных температурных условиях
2.	Энтропия Л.Больцмана	$S_b = k \ln P$	Оценивается потенциальная изменчивость объекта (системы)
3.	Энтропия Дж. Гиббса	$S_g = -k \int_{-\infty}^{+\infty} f_n(x, t) \cdot \ln f_n(x, t) dx + S_0$	Оценивается состояние объекта (системы) в n-мерном фазовом пространстве на основе корреляционного анализа
4.	Энтропия Кульбака	$S_k = kT \int_{-\infty}^{+\infty} f(v, t) \cdot \ln(f/f_0) dv \geq 0$	Оценивается состояние открытых систем с позиций обмена энергией частиц вещества

5.	Энтропия Крылова- Колмогорова- Синяя	$K = \sum_i \lambda_i (\lambda_i > 0)$	Служит критерием динамической неустойчивости движения частиц вещества
6.	Информационная энтропия К.Шеннона	$H_0 = -\sum_{j=0}^r P(D_j) \cdot \ln P(D_j)$	Служит универсальной мерой для оценки степени неопределенности (упорядоченности) объекта (системы)

Здесь для оценки информативности конкретного, проявляющегося диагностического признака необходимо произвести выбор информационного критерия с учетом изменения энтропии рассматриваемой системы (табл.2).

Таблица 2.

Выбор критериев информативности

Информационный критерий	Расчетная формула (символ)
1. Диагностический признак (параметр) K , при изменении которого можно сделать предположение о состоянии системы (поставить диагноз).	K
2. Статистический вес P – число возможных пересечений состояний системы (способов состояний системы).	$P = m^n$
3. Диагностический вес Z – информация о состоянии, которой обладает конкретный признак K_j .	$Z = \log_2 \frac{P(k_j / D)}{P(k_j)}$
4. Диагностическая ценность обследования Z_D - количество информации, вносимое обследованием в систему диагнозов.	$Z_D(K_j) = \sum_{i=1}^n P(D) \cdot Z_{Di}(k_j)$
5. Энтропия Шеннона H – степень неопределенности системы или степень ее потенциальной информации (изменчивости).	$H = -\sum_{j=0}^r P(D_j) \cdot \ln P(D_j)$
6. Объем информации признака I - количество информации, вносимое признаком в систему диагнозов.	$I = H_0 - H(\xi)$

Мера, предложенная К. Шенноном для анализа сообщений, передаваемых по каналам связи, чрезвычайно удобна из-за простоты ее вычисления, аддитивности по отношению к последовательно поступающим сообщениям и сходства с важной физической величиной – термодинамической энтропией. Применительно к элементам и системам АТ она становится единственной и универсальной мерой количества информации.

Однако понятие статистической энтропии Больцмана и теряет первоначальный смысл, характерный для классической термодинамики, в информационных процессах АТ этот параметр может быть использован в несколько ином качестве, не столько в качестве жесткого ограничения, сколько в качестве оценочного параметра, а именно, энтропия К.Шеннона (информационная энтропия) может быть использована для оценки относительной степени упорядоченности технических состояний систем АТ как в процессе технического обслуживания, так и при ее ремонте.

Раздел III.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ АТ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ

Лекция 6. Методы линейных диагностических матриц. Методы анализа в пространстве признаков

Задачи факторного анализа. Матричная форма факторной модели.

Данный вид анализа позволяет диагносту решить две основные задачи: описать предмет исследования компактно и в то же время всесторонне. С помощью факторного анализа возможно выявление факторов, отвечающих за наличие линейных статистических связей корреляций между наблюдаемыми переменными (параметрами).

Рассмотрим цели факторного анализа. К примеру, анализируя оценки, полученные по нескольким шкалам, исследователь отмечает, что они сходны

между собой и имеют высокий коэффициент корреляции, в этом случае он может предположить, что существует некоторая латентная переменная, с помощью которой можно объяснить наблюдаемое сходство полученных оценок. Такую латентную переменную называют фактором, который влияет на многочисленные показатели других переменных, что приводит к возможности и необходимости отметить его как наиболее общий, более высокого порядка.

Таким образом, можно выделить две цели факторного анализа:

- определение взаимосвязей между переменными, их классификация, т. е. «объективная R-классификация»;
- сокращение числа переменных.

Для выявления наиболее значимых факторов и, как следствие, факторной структуры, наиболее оправданно применять метод главных компонентов. Суть данного метода состоит в замене коррелированных компонентов некоррелированными факторами. Другой важной характеристикой метода является возможность ограничиться наиболее информативными главными компонентами и исключить остальные из анализа, что упрощает интерпретацию результатов. Достоинство данного метода также в том, что он – единственный математически обоснованный метод факторного анализа.

Факторный анализ – методика комплексного и системного изучения и измерения воздействия факторов на величину результативного показателя.

Классификация факторного анализа

Существуют следующие типы факторного анализа:

- 1) Детерминированный (функциональный) – результативный показатель представлен в виде произведения, частного или алгебраической суммы факторов.
- 2) Стохастический (корреляционный) – связь между результативным и факторными показателями является неполной или вероятностной.
- 3) Прямой (дедуктивный) – от общего к частному.

- 4) Обратный (индуктивный) – от частного к общему.
- 5) Одноступенчатый и многоступенчатый.
- 6) Статический и динамический.
- 7) Ретроспективный и перспективный.

Также факторный анализ может быть разведочным – он осуществляется при исследовании скрытой факторной структуры без предположения о числе факторов и их нагрузках и конфирматорным, предназначенным для проверки гипотез о числе факторов и их нагрузках. Практическое выполнение факторного анализа начинается с проверки его условий.

Обязательные условия факторного анализа:

- Все признаки должны быть количественными;
- Число признаков должно быть в два раза больше числа переменных;
- Выборка должна быть однородна;
- Исходные переменные должны быть распределены симметрично;
- Факторный анализ осуществляется по коррелирующим переменным.

При анализе в один фактор объединяются сильно коррелирующие между собой переменные, как следствие происходит перераспределение дисперсии между компонентами и получается максимально простая и наглядная структура факторов. После объединения коррелированность компонент внутри каждого фактора между собой будет выше, чем их коррелированность с компонентами из других факторов. Эта процедура также позволяет выделить латентные переменные, что бывает особенно важно при анализе социальных представлений и ценностей.

Этапы факторного анализа

Как правило, факторный анализ проводится в несколько этапов.

Этапы факторного анализа:

- 1 этап. Отбор факторов.
- 2 этап. Классификация и систематизация факторов.
- 3 этап. Моделирование взаимосвязей между результативным и факторными показателями.

4 этап. Расчет влияния факторов и оценка роли каждого из них в изменении величины резульативного показателя.

5 этап. Практическое использование факторной модели (подсчет резервов прироста резульативного показателя).

По характеру взаимосвязи между показателями различают методы детерминированного и стохастического факторного анализа. Детерминированный факторный анализ представляет собой методику исследования влияния факторов, связь которых с резульативным показателем носит функциональный характер, т. е. когда резульативный показатель факторной модели представлен в виде произведения, частного или алгебраической суммы факторов.

Методы детерминированного факторного анализа

- метод цепных подстановок;
- метод абсолютных разниц;
- метод относительных разниц;
- интегральный метод;
- метод логарифмирования.

Данный вид факторного анализа наиболее распространен, поскольку, будучи достаточно простым в применении (по сравнению со стохастическим анализом), позволяет осознать логику действия основных факторов развития предприятия, количественно оценить их влияние, понять, какие факторы, и в какой пропорции возможно и целесообразно изменить для повышения эффективности производства.

Методы стохастического факторного анализа

- способ парной корреляции;
- множественный корреляционный анализ;
- матричные модели;
- математическое программирование;
- метод исследования операций;
- теория игр.

Стохастический анализ представляет собой методику исследования факторов, связь которых с результативным показателем в отличие от функциональной является неполной, вероятностной (корреляционной). Если при функциональной (полной) зависимости с изменением аргумента всегда происходит соответствующее изменение функции, то при корреляционной связи изменение аргумента может дать несколько значений прироста функции в зависимости от сочетания других факторов, определяющих данный показатель.

Необходимо также различать **статический и динамический факторный анализ**. Первый вид применяется при изучении влияния факторов на результативные показатели на соответствующую дату. Другой вид представляет собой методику исследования причинно-следственных связей в динамике.

И, наконец, факторный анализ может быть ретроспективным, который изучает причины прироста результативных показателей за прошлые периоды, и перспективным, который исследует поведение факторов и результативных показателей в перспективе.

Факторный анализ в учебной литературе трактуется как раздел многомерного статистического анализа, объединяющий методы оценки размерности множества наблюдаемых переменных посредством исследования структуры ковариационных или корреляционных матриц. Факторный анализ со статистической точки зрения связан с поиском новых диагностических признаков, характеризующих объекты наблюдения на основе имеющейся информации, которая содержится в измеренных значениях k исходных признаков. Всю информацию об n объектах наблюдения можно представить в виде матрицы или прямоугольной таблицы "признак - состояние" или «признак – параметр» (табл. 3) [1].

Таблица 3

Матричная форма представления факторного анализа

Диагностические признаки	D ₀ (все системы исправны)	D ₁ (повреждение вентилятора)	D ₂ (повреждение КНД)
K ₁ (попадание посторонних предметов во входное устройство двигателя и вентилятор)	0	1	1
K ₂ (разрушение задних опор валов)	0	0	0
K ₃ (коробление и прогары камеры сгорания)	0	1	1
K ₄ (возникновение и развитие трещин на рабочих лопатках компрессора)	0	0	1
K ₅ (обрыв лопаток компрессора)	0	0	1
K ₆ (разбандажирование полок рабочих лопаток КНД)	0	1	1

Метод разделения в пространстве признаков

В ряду аналитических методов диагностики определенную нишу занимают методы разделения в пространстве признаков. Эти методы основаны на естественной «гипотезе компактности», в соответствии с которой точки, отображающие одно и то же состояние (диагноз), группируются в одной области пространства диагностических признаков. Как и в метрических методах распознавания, состояние изделия характеризуется точкой в пространстве признаков. Предполагается, что области диагнозов не пересекаются и поэтому возможно построить разделяющую поверхность.

Рассмотрим распознавание двух состояний, например, исправного и неисправного: D_1 и D_2 (дифференциальная диагностика или дихотомия). При наличии нескольких диагнозов распознавание может быть сведено к последовательному применению некоторых алгоритмов. В основе методов разделения лежит построение скалярной функции параметров (признаков), принимающей различные знаки в двух областях диагноза (33).

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m) = f(\vec{x}), \quad (33)$$

Такую функцию называют разделяющей, и тогда

$$\left. \begin{aligned} f(\bar{x}) > 0 & \text{ при } \bar{x} \in D_1; \\ f(\bar{x}) < 0 & \text{ при } \bar{x} \in D_2. \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Таким образом, разделяющая функция с положительным значением для всех изделий, имеющих состояние D_1 , и отрицательное значение - в противоположном случае.

Условие (34) образует решающее правило для разделения в пространстве признаков.

Если для предъявленного для распознавания объекта, характеризующегося вектором \bar{x} , значение $f(\bar{x})$ положительно, объект считают принадлежащим состоянию D_1 , при отрицательном значении $f(\bar{x})$ – состоянию D_2 .

Уравнение $f(\bar{x}) = 0$ будет составлять уравнение разделяющей поверхности (поверхности, разделяющей области диагнозов).

Наиболее простой вид имеет линейная разделяющая функция

$$f(\bar{x}) = \lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 + \dots + \lambda_m x_m + \lambda_{m+1}, \quad (35)$$

где m – число признаков (размерность пространства); $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ – «весовые» коэффициенты.

Разделяющая поверхность будет гиперплоскостью («плоскостью» в многомерном пространстве)

$$f(\bar{x}) = \lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 + \dots + \lambda_m x_m + \lambda_{m+1} = 0. \quad (36)$$

Для случая двух признаков (параметров) разделяющая плоскость будет разделяющей прямой (рис.23).

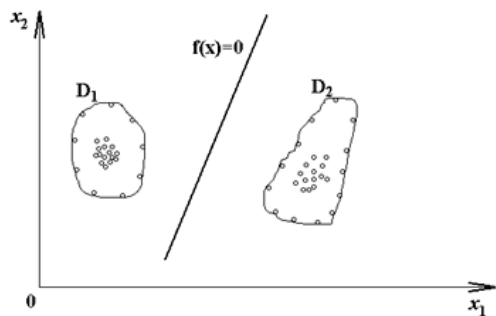


Рис.23. Линия, разделяющая функции для двух диагнозов

Для удобства геометрической интерпретации введем формально еще один параметр $x_{m+1} = 1$.

Разделяющая функция может быть теперь представлена в виде скалярного произведения

$$f(\vec{x}) = \lambda_1 x_1 + \dots + \lambda_m x_m + \lambda_{m+1} x_{m+1} = \vec{\lambda} \cdot \vec{x}, \quad (37)$$

где $\vec{\lambda}$ – «весовой» вектор

$$\vec{\lambda} = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{m+1}\}.$$

Решающее правило будет таким:

$$\left. \begin{array}{l} \text{если } \vec{\lambda} \cdot \vec{x} > 0, \text{ то } \vec{x} \in D_1; \\ \text{если } \vec{\lambda} \cdot \vec{x} < 0, \text{ то } \vec{x} \in D_2. \end{array} \right\} \quad (38)$$

Уравнение разделяющей гиперплоскости $f(\vec{x}) = \vec{\lambda} \cdot \vec{x} = 0$.

Из последнего равенства следует, что разделяющая гиперповерхность перпендикулярна «весовому» вектору и проходит через начало координат (в дополненном пространстве признаков размерности $m+1$). Чтобы осуществить диагностику с помощью линейной разделяющей функции, достаточно знать компоненты весового вектора.

Примем, что разделяющая плоскость проходит через точку, находящуюся на середине прямой, соединяющей точки эталонов (точку A , рис. 24), перпендикулярную этой прямой.

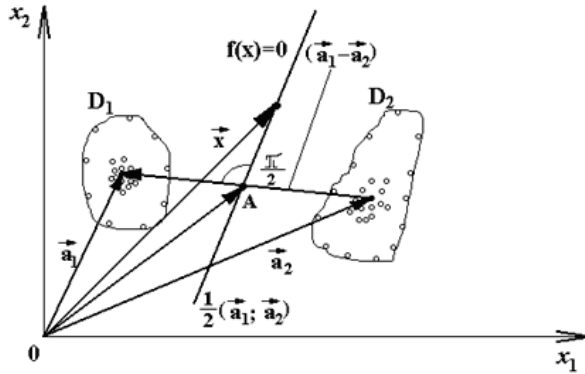


Рис.24. Приближенный способ построения разделяющей гиперплоскости

Так как точка A характеризуется вектором $\frac{1}{2}(\overline{a_1} + \overline{a_2})$, то уравнение разделяющей плоскости будет

$$f(\vec{x}) = \left[\vec{x} - \frac{1}{2}(\overline{a_1} + \overline{a_2}) \right] \cdot (\overline{a_1} - \overline{a_2}) = 0 \quad (39)$$

Скалярное произведение вектора, лежащего в разделяющей плоскости, и вектора, нормального к ней, обращается в нуль.

Развертывая уравнение, находим

$$f(x) = (a_{11} - a_{21})x_1 + \dots + (a_{1m} - a_{2m})x_m + \frac{1}{2}(a_1^2 - a_2^2) = 0 \quad (40)$$

где a_1 и a_2 в квадрате – квадраты длины векторов $\overline{a_1}$ и $\overline{a_2}$.

Сопоставляя последние два равенства, находим составляющие весового вектора:

$$\lambda_1 = a_{11} - a_{21}; \lambda_2 = a_{12} - a_{22}; \quad (41)$$

$$\lambda_m = a_{1m} - a_{2m};$$

$$\lambda_{m+1} = \frac{1}{2} \left(a_1^2 - a_2^2 \right) \quad (42)$$

Последние соотношения (42) устанавливают приближенные значения компонентов весового вектора.

Лекция 7. Метод Байеса и методы статистических решений [9]

Тексты лекции основаны на материалах учебного пособия «Диагностика и неразрушающий контроль летательных аппаратов и авиадвигателей» при непосредственном участии автора.

В предыдущей лекции говорилось о роли и месте вероятностных методов распознавания состояний объектов (систем). Преимущество этих методов состоит в возможности одновременного учета признаков различной физической природы, так как они характеризуются безразмерными величинами - вероятностями проявления при различных состояниях.

Объект (систему) относят к определенному классу (диагнозу, состоянию) из числа заранее известных на основании информативности проявляемых диагностических признаков. Рассмотрим типовые методы решения задач классификации.

Распознавание с помощью метода Байеса

Если имеется возможность собрать большой объем информации о связях признаков с состояниями и о частоте проявления этих состояний, эффективным методом распознавания будет метод Байеса. Метод основан на таком подходе: если имеется диагноз D_i и простой признак K_j встречающийся при этом диагнозе, то вероятность совместного появления события

$$P(D_i, K_j) = P(D_i)P(K_j/D_i), \quad (43)$$

а так называемый *условный диагноз* по Байесу будет равен:

$$P(D_i / K_j) = [P(D_i)P(K_j/D_i)]/P(K_{js}), \quad (44)$$

где $P(D_i)$ - априорная вероятность диагноза D_i (определяется по статистическим данным); $P(K_j/D_i)$ - вероятность появления признака K_j у объектов с состоянием D_i ; $P(K_{js})$ - вероятность появления признака K_j во всех объектах независимо от их состояния (если из общего числа N объектов признак K_j проявился у N_j объектов, то $P(K_{js})= N_j/N$; $P(D_i / K_j)$ - вероятность диагноза D_j после того, как стало известно наличие у рассматриваемого объекта признака K_j (апостериорная вероятность диагноза).

Для практического использования метода Байеса необходимо сформировать исходную диагностическую матрицу (табл. 4), дополненную данными об априорных вероятностях возможных состояний $P(D_i)$.

Используя данные (табл. 4), определим, воспользовавшись формулой (44), вероятности диагнозов для различных ситуаций одновременного проявления двух диагностических признаков. Таких ситуаций может быть четыре:

Таблица 4

Диагностическая матрица (исходные диагностические данные)

Состояние	Вероятности проявления признаков				$P(D_i)$
	$P(K_1 / D_i)$	$P(\bar{K}_1 / D_i)$	$P(K_2 / D_i)$	$P(\bar{K}_2 / D_i)$	
D ₁	0,1	0,9	0,8	0,2	0,1
D ₂	0,5	0,5	0,3	0,7	0,2
D ₃	0,9	0,1	0,2	0,8	0,7

\underline{K}_1, K_2 - появились признаки K_1 и K_2 ;
 \bar{K}_1, K_2 - признак K_1 отсутствует, K_2 - присутствует;
 $\underline{K}_1, \bar{K}_2$ - признак K_1 присутствует, K_2 - отсутствует;
 \bar{K}_1, \bar{K}_2 - отсутствуют оба признака.

Обратите внимание, что значения всех знаменателей здесь одинаковы, что значительно упрощает расчеты. Итак, в итоге:

Для ситуации \underline{K}_1, K_2 имеем:

$$P(D_1/K_1K_2) = \frac{0.1 * 0.8 * 0.1}{0.1 * 0.8 * 0.1 + 0.2 * 0.3 * 0.5 + 0.7 * 0.2 * 0.9} = 0.04$$

$$P(D_2/K_1K_2) = \frac{0.2 * 0.3 * 0.5}{0.1 * 0.8 * 0.1 + 0.2 * 0.3 * 0.5 + 0.7 * 0.2 * 0.9} = 0.18$$

$$P(D_3/K_1K_2) = \frac{K_1, K_2 \quad 0.7 * 0.2 * 0.9}{0.1 * 0.8 * 0.1 + 0.2 * 0.3 * 0.5 + 0.7 * 0.2 * 0.9} = 0.78 \quad ;$$

Для ситуации \bar{K}_1, K_2 :

$$P(D_1/\bar{K}_1K_2) = 0.62 ; P(D_2/\bar{K}_1K_2) = 0.26 ; P(D_3/\bar{K}_1K_2) = 0.12.$$

Для ситуации K_1, \bar{K}_2 :

$$P(D_1/K_1\bar{K}_2) = 0 ; P(D_2/K_1\bar{K}_2) = 0.12 ; P(D_3/K_1\bar{K}_2) = 0.88.$$

Для ситуации \bar{K}_1, \bar{K}_2 :

$$P(D_1/\bar{K}_1\bar{K}_2) = 0.12 ; P(D_2/\bar{K}_1\bar{K}_2) = 0.48 ; P(D_3/\bar{K}_1\bar{K}_2) = 0.4.$$

Сведем результаты в табл. 2.2:

Таблица 5

Результаты расчетов диагнозов по методу Байеса

Состояния	Ситуации по признакам			
	K_1, K_2	\bar{K}_1, K_2	K_1, \bar{K}_2	\bar{K}_1, \bar{K}_2
D_1	0,04	0,62	0	0,12
D_2	0,18	0,26	0,12	0,58
D_3	0,78	0,12	0,88	0,40

Расчеты показывают, что состоянию D_1 наиболее вероятно соответствует ситуация \bar{K}_1, K_2 ; состоянию $D_2 - \bar{K}_1, \bar{K}_2$; состоянию $D_3 - K_1, \bar{K}_2$

Приведенные алгоритмы элементарно реализуются на ПК, чем обеспечивается возможность компьютерного диагностирования. Важно лишь отслеживать априорные (полученные на основе исходной статистической информации) вероятности в диагностических матрицах и вовремя их корректировать (пополнять).

Распознавание методами статистических решений

Пусть выполняется диагностирование ГТД по содержанию примесей железа в масле (параметр K). Задача состоит в выборе значения K_0 параметра

K таким образом, что при $K > K_0$ двигатель снимается с эксплуатации, а при $K < K_0$ двигатель допускается к дальнейшей работе. Имеется как бы два класса состояний: D_1 - исправное состояние, D_2 - неисправное состояние.

Правило принятия решения состоит в том, что при $K < K_0$ $K \in D_1$, при $K > K_0$ $K \in D_2$. Статистические распределения параметра K для исправных и неисправных двигателей показаны на рис. 25.

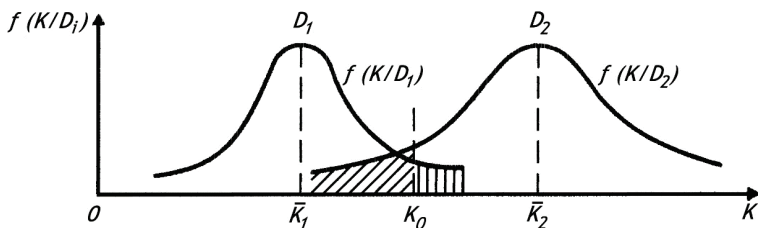


Рис.25.Графическая интерпретация задачи

Области исправного D_1 и неисправного D_2 состояний пересекаются, образуя своего рода зону неопределенности. Задача состоит в выборе значения K_0 , которое оптимальным образом разделяло бы объекты на исправные и неисправные. Вообще говоря, при выборе K_0 вовсе избежать ошибок принципиально невозможно, так как сами по себе состояния являются событиями случайными.

Таких ошибок может быть две: *ложная тревога* - когда принимается решение о неисправном состоянии, но в действительности объект находится в исправном состоянии; *пропуск дефекта* - когда вместо диагноза D_2 присваивается диагноз D_1 . Очевидно, что эти ошибки могут иметь различные последствия и различные цены. В теории контроля приняты обозначения H_{21} - ложная тревога, H_{12} - пропуск дефекта (первая цифра нижнего индекса соответствует индексу принятого диагноза, вторая цифра - индексу действительного состояния).

Из рис. 25 видно, что вероятность ложной тревоги равна вероятности

произведения двух событий: исправного состояния и значения $K > K_0$. Тогда

$$P(H_{21}) = P(D_1)P(K > K_0/D_1) = P_1 \int_{K_0}^{\infty} f(K/D_1)dK. \quad (45)$$

Аналогично находят вероятность пропуска дефекта

$$P(H_{12}) = P(D_2)P(K > K_0/D_2) = P_2 \int_{-\infty}^{K_0} f(K/D_2)dK. \quad (46)$$

В силу того, что допустить обе ошибки одновременно нельзя (или H_{12} , или H_{21}), общая вероятность принятия ошибочного решения будет равна их сумме. Если приписать цены этим ошибкам, то получим выражение для среднего риска:

$$R = C_{21}P_1 \int_{K_0}^{\infty} f(K/D_1)dK + C_{12}P_2 \int_{-\infty}^{K_0} f(K/D_2)dK. \quad (47)$$

Практика показывает, что среднестатистическое соотношение между ценой пропуска дефекта и ценой ложной тревоги $C_{12}/C_{21} = 10 \dots 50$.

Метод минимального риска. Найдем граничное значение K_0 из условия минимума среднего риска. Дифференцируя R по K_0 и приравнявая производную к нулю, получим условие экстремума:

$$dR/dK_0 = C_{21}P_1 f(K/D_1) + C_{12}P_2 f(K/D_2) = 0 \quad (48)$$

или

$$\frac{f(K_0/D_1)}{f(K_0/D_2)} = \frac{C_{12}P_2}{C_{21}P_1}, \quad (49)$$

где

$$f(K_0/D_1) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(K_0 - K_1)^2}{2\sigma_1^2}}, \quad (50)$$

$$f(K_0/D_1) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(K_0 - K_2)^2}{2\sigma_2^2}}.$$

Подставив два последних соотношения (50) в исходное равенство, после логарифмирования получаем квадратное уравнение, корнями которого будут два значения: K_{01} и K_{02} . Окончательным будет то значение K_0 , которое лежит в рассматриваемом интервале неопределенности (см. рис. 25).

Метод минимального числа ошибочных решений. В этом методе не учитывают цены ошибок. Вероятность ошибочного решения

$$P_{\text{ош}} = P_1 \int_{K_0}^{\infty} f(K/D_1) dK + P_2 \int_{-\infty}^{K_0} f(K/D_2) dK. \quad (51)$$

Отсюда условие получения K_0 :

$$\frac{f(K_0/D_1)}{f(K_0/D_2)} = \frac{P_2}{P_1} \quad (52)$$

Вычисления K_0 аналогичны расчетам по методу минимального риска.

Метод наибольшего правдоподобия. Это частный случай метода минимального риска, когда $C_{12} = C_{21}$ и $P_1 = P_2$, т. е. условие получения K_0 :

$$f(K_0/D_1) = f(K_0/D_2).$$

Метод итераций. Он применяется, если отсутствуют данные по P_1 и P_2 , что делает необходимым находить искомое K_0 методом приближений. Граничное значение K_0 определяют из уравнения:

$$C_{21}[1 - F(K_0/D_1)] - C_{12}F(K_0/D_2) = 0. \quad (53)$$

Функции нормального распределения имеют вид:

$$F(K_0/D_1) = 0.5 + \Phi\left(\frac{K_0 - \bar{K}_1}{\sigma_1}\right); F(K_0/D_2) = 0.5 + \Phi\left(\frac{K_0 - \bar{K}_2}{\sigma_2}\right), \quad (54)$$

где $\Phi\left(\frac{K_0 - \bar{K}_i}{\sigma_i}\right)$ – табулированная функция Лапласа.

Сначала рассчитывают первое приближение:

$$K_{0(1)} = (\bar{K}_1 + \bar{K}_2)/2,$$

затем второе (по методу Ньютона):

$$K_{0(2)} = (K_{0(1)} - \varphi(K_{0(1)}) / \varphi'(K_{0(1)}),$$

где

$$\varphi(K_{0(1)}) = C_{21}[1 - F(K_{0(1)}/D_1)] - C_{12}F(K_{0(1)}/D_2);$$

$$\varphi'(K_{0(1)}) = C_{21}f(K_{0(1)}/D_1) - C_{12}f(K_{0(1)}/D_2).$$

Приближения делаются до тех пор, пока между соседними K_0 не будет существенных расхождений.

Реализация приведенных выше методов хотя и дает возможность довольно точно распознать объекты, тем не менее несколько ограничена.

Главная трудность - это построение правого "горба" $f(K/D_2)$ (рис. 25), если речь идет о достаточно серьезных последствиях отказа. К тому же, как правило, неустойчивы априорные оценки P_1 и P_2 . Поэтому описанные методы рекомендуется применять в основном для многократно резервируемых систем ВС.

РАЗДЕЛ IV. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ АВИАКОНСТРУКЦИЙ

Лекция 8. Основные принципы и методы прогнозирования состояния авиаконструкций. Технология формирования моделей поведения диагностических параметров по наработке [9].

Важную информацию о процессах естественного старения деталей АТ при работе несут совокупности значений диагностических параметров, измеренных через периодические интервалы наработки. Речь идет о непрерывных функциях, характеризующих изменение состояния объекта диагностирования в эксплуатации на прогнозируемый период. При правильно составленном прогнозе можно обосновать режимы диагностирования, т.е. периодичность и объемы контрольных операций, что необходимо для составления индивидуальных программ ТОиР.

Основные прогностические понятия

- Прогноз — обоснованное суждение о возможном состоянии объекта в будущем или альтернативных путях и сроках достижения этих состояний.

- Прогнозирование — процесс разработки прогноза.

- Этап прогнозирования — часть процесса разработки прогнозов, характеризующаяся своими задачами, методами и результатами. Деление на этапы связано со спецификой построения систематизированного описания объекта прогнозирования, сбора сведений, с построением модели, верификацией прогноза.

- Прием прогнозирования — одна или несколько математических или логических операций, направленных на получение конкретного результата в процессе разработки прогноза. В качестве приема могут выступать сглаживание динамического ряда, определение компетентности эксперта, вычисление средневзвешенного значения оценок экспертов и т. д.

- Модель прогнозирования — модель объекта прогнозирования, исследование которой позволяет получить информацию о возможных состояниях объекта прогнозирования в будущем и (или) путях и сроках их осуществления.

- Метод прогнозирования — способ исследования объекта прогнозирования, направленный на разработку прогноза. Методы прогнозирования являются основанием для методик прогнозирования.

- Методика прогнозирования — совокупность специальных правил и приемов (одного или нескольких методов) разработки прогнозов.

- Прогнозирующая система — система методов и средств их реализации, функционирующая в соответствии с основными принципами прогнозирования. Средствами реализации являются экспертная группа, совокупность программ и т. д. Прогнозирующие системы могут быть автоматизированными и неавтоматизированными.

- Прогнозный вариант — один из прогнозов, составляющих группу возможных прогнозов.

- Объект прогнозирования — процесс, система, или явление, о состоянии которого даётся прогноз.

- Характеристика объекта прогнозирования — качественное или количественное отражение какого-либо свойства объекта прогнозирования.

- Переменная объекта прогнозирования — количественная характеристика объекта прогнозирования, которая является или принимается за изменяемую в течение периода основания и (или) периода упреждения прогноза.

- Сложность объекта прогнозирования — характеристика объекта прогнозирования, определяющая разнообразие его элементов, свойств и отношений.

- Период основания прогноза — промежуток времени, за который используют *информацию* для разработки прогноза. Этот промежуток времени называют также периодом предыстории.

- Период упреждения прогноза — промежуток времени, на который разрабатывается прогноз.

- Прогнозный горизонт — максимально возможный период упреждения прогноза заданной точности.

- Точность прогноза — оценка доверительного интервала прогноза для заданной вероятности его осуществления.

- Достоверность прогноза — оценка вероятности осуществления прогноза для заданного доверительного интервала.

- Ошибка прогноза — апостериорная величина отклонения прогноза от действительного состояния объекта.

- Источник ошибки прогноза — фактор, способный привести к появлению ошибки прогноза. Различают источники регулярных и нерегулярных ошибок.

- Верификация прогноза — оценка достоверности и точности или обоснованности прогноза.

- Эксперт — квалифицированный специалист по конкретной проблеме, привлекаемый для вынесения оценки по поставленной задаче прогноза.

- Компетентность эксперта — способность эксперта выносить на базе профессиональных знаний, интуиции и опыта достоверные суждения об объекте прогнозирования. Количественная мера компетентности эксперта называется коэффициентом компетентности.

- Экспертная группа — коллектив экспертов, сформированный по определенным правилам для решения поставленной задачи прогноза. Частным случаем экспертной группы выступает экспертная комиссия.

- Компетентность группы экспертов — способность экспертной группы выносить суждения об объекте прогнозирования, адекватные мнению генеральной совокупности экспертов. Компетентность экспертной группы определяется различными методиками.

- Экспертная оценка — суждение эксперта или экспертной группы относительно поставленной задачи прогноза. В первом случае используется термин «индивидуальная экспертная оценка», во втором — «коллективная экспертная оценка».

Основные принципы прогнозирования

Прогноз – конкретное предвидение, суждение о состоянии какого-либо явления в будущем на основе статистических, научных исследований. В зависимости от того, какая задача решается в первую очередь, различают два вида прогнозирования: исследовательское (или поисковое) и нормативное.

Перейдем к конкретному примеру. Если измерять дискретные значения диагностического параметра K по времени t для конкретного объекта диагностирования, то получим совокупность (выборку) случайных точек, соединив которые можно в первом¹¹ представлении выявить характер происходящих изменений параметра.

Штриховая линия на рис. 26 представляет собой сглаженную реализацию случайной функции $K(t)$. Совокупность реализаций для группы

однотипных объектов образует многомерную случайную функцию $K(t)$. В каждый момент времени случайная функция будет характеризоваться непрерывным случайным распределением - плотностью вероятности. В дальнейшем будем считать, что распределение $f(k)$ 'в любом сечении' наработки t_i будет подчиняться нормальному (распределение Гаусса) закону.

Для Гауссовского закона распределения случайной величины характерны три параметра: математическое ожидание (момент первого порядка) $m(k)$; дисперсия случайного распределения (момент второго порядка) S ; среднее квадратическое отклонение σ .

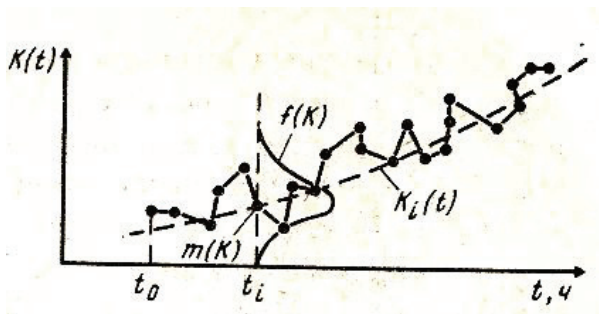


Рис. 26. К вопросу об аппроксимации (сглаживании) статистической выборки

Плотность вероятности для этого закона будет равна:

$$f(K) = \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} \exp - \frac{(K_i - K_{cp})^2}{2\sigma_k^2}. \quad (55)$$

Отсюда максимальная ордината нормального распределения случайной величины (мода)

$$f(K) = \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}}.$$

Ширина разброса нормально распределенной случайной величины (доверительный интервал)

$$\pm \delta = \tau_{\beta} \sigma,$$

где τ_{β} - табулированный коэффициент, зависящий от принятого уровня вероятности P и числа степеней свободы (количество точек).

Обычно принимают $P = 0,997$. Тогда $\tau_{\beta} = 3,0$, отсюда для распределения Гаусса ширина разброса $\pm \delta = 3\sigma$.

Вернемся к случайным функциям. Важной характеристикой непрерывной случайной функции $K(t)$ является т.н. автокорреляционная функция или корреляционный момент для значений случайной функции на интервале времени t_1 и t_2 :

$$M_K(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} (K_1 - K_{1cp})(K_2 - K_{2cp}) f(K_1, K_2; t_1, t_2) dK_1 dK_2, \quad (56)$$

где $f(K_1, K_2; t_1, t_2)$ - двумерная плотность распределения случайной функции, которая характеризует связь значений случайной функции при двух различных моментах времени t_1 и t_2 .

Величины K_1 и K_2 относятся к одной и той же реализации процесса, а интегрирование (суммирование) проводится по множеству реализаций.

Автокорреляционная функция показывает наличие или отсутствие связей между двумя соседними выборками. Эту связь удобно оценивать с помощью нормированной корреляционной функции [6]:

$$\rho_k(t_1, t_2) = M_K(t_1, t_2) / [\sigma_K(t_1)\sigma_K(t_2)]. \quad (57)$$

Если значения $K(t_1)$ и $K(t_2)$ независимые (процесс с сильным перемешиванием реализаций) (рис. 27 а), то нормированная корреляционная функция обращается в ноль. Если перемешивание слабое (рис. 27 б), то $\rho_k(t_1, t_2) \rightarrow 1,0$.

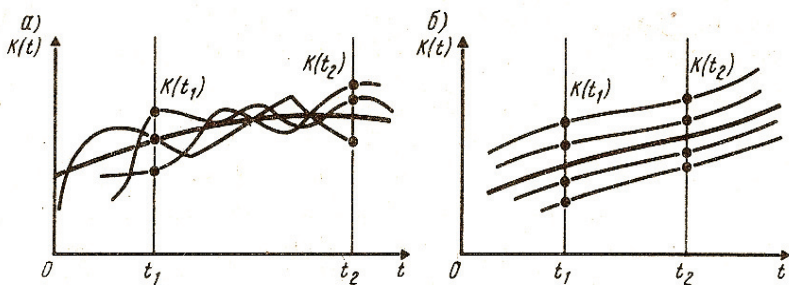


Рис. 27. Примеры перемешивания реализаций

При $\rho_K(t_1, t_2) = 0,6 \dots 1,0$ прогноз можно осуществлять по отдельно взятой реализации с учетом только ее доверительных интервалов. При малом значении $\rho_K(t_1, t_2)$ прогноз выполняется с учетом совокупности всех реализаций (рис. 28.). Очевидно, что в первом случае прогноз будет достовернее.

Построение случайных функций начинается с упорядочения статистических данных. Это упорядочение осуществляется с помощью матриц [5].

Матрица состоит из N горизонтальных строк с равномерными интервалами значений параметра ΔK и n вертикальных столбцов с равномерными интервалами наработки Δt .

Попробуем оценить реализацию изменения параметра "вибрация" по наработке. Предположим, что исходное значение вибрации (при наработке .0) равно (условно) 1,0. Через интервалы $\Delta t = 500$ ч зафиксированы последовательно шесть значений вибраций: 5, 7, 12, 3, 6, 16. Строго говоря, соединить эти семь точек на графике и говорить о реализации нельзя.

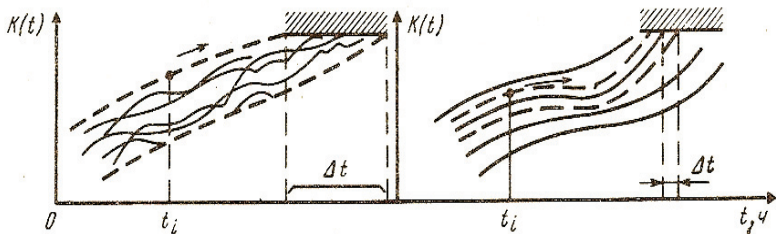


Рис. 28. Прогнозы с учетом перемешивания реализаций

Ведь если цифра "5" появилась в связи с некоторой раскаткой наружной обоймы подшипника, то следующая цифра "7" может быть связана с каким-то другим независимо развивающимся дефектом, например с неравномерной выработкой лабиринтных уплотнений на дисках компрессора и т. п. В подобных случаях принято говорить не о реализациях, а о совокупности случайных величин, представляющих отдельные реализации.

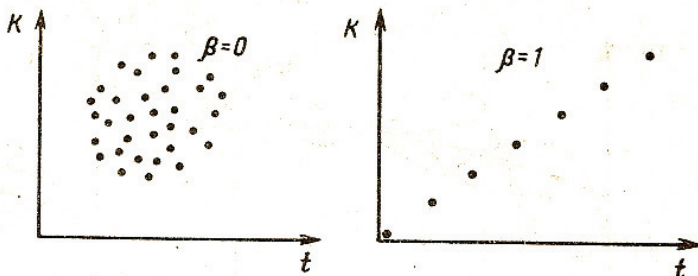


Рис. 29. Примеры связей аргумента и функции

Количественно степень тесноты связи такой совокупности может быть определена с помощью коэффициента корреляции (если связь линейная) или корреляционного отношения (если связь нелинейная).

Коэффициент корреляции определяется как:

$$\beta = M(t, K) / (\sigma_t \sigma_K), \quad (58)$$

где $M(t, K)$ - второй смешанный центральный момент всей совокупности точек; σ_t, σ_K - средние квадратические отклонения соответственно относительно t и относительно K .

Если $\beta = 0$, то связи нет, если $\beta = 1$ то связь функциональная, т. е. случайных колебаний относительно среднего значения функции нет (рис. 29 правый).

Используя исходные данные, строим выборочно по каждому сечению t_i оценки математических ожиданий m_j и дисперсий S_i^2 по формулам (59):

$$m_{iK} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i^{t_i}; S_{iK}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (K_i - K_{cp}^{t_i})^2, \quad (59)$$

где K - значения диагностического параметра для фиксированного значения наработки.

Полученные результаты приведены на рис. 30.

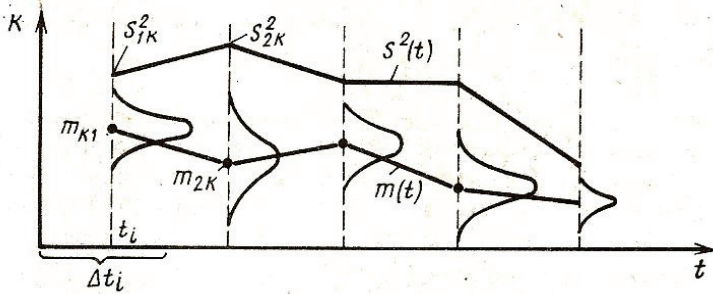


Рис. 30. Этапы аппроксимации (сглаживания) случайной функции

Для аппроксимации (сглаживания) изменений во времени математического ожидания $m(t)$ дисперсии $S^2(t)$ подбирают многочлен некоторой степени (полином n -го порядка), который "наилучшим образом" описывает совокупность точек.

В общем виде такой полином удовлетворяет уравнению (60):

$$K(t) = a_0 + a_1 t + \dots + a_n t^n = \sum_{i=0}^n a_i t^i. \quad (60)$$

Распространенным методом подбора кривых является метод наименьших квадратов. По данному методу коэффициенты a , выбирают так, чтобы квадратическая погрешность (отклонение от линии аппроксимирующей функции) имела минимальное значение, т. е.

$$\Delta = \sum_{i=1}^m [K(t) - K_i]^2 = \min,$$

где m - число экспериментальных точек.

Ограничимся степенью полинома, равной 2,0 (что соответствует параболы), и запишем условие метода наименьших квадратов.

$$\Delta = \sum_{i=1}^m [K(t)_i - \varphi(K_i; a_0, a_1, a_2)]^2 = \min,$$

где $\varphi(K_i; a_0, a_1, a_2)$ - значение частной производной функции заданного вида.

Найдем a_0, a_1, a_2 , образующие левую часть уравнения в минимум. Для этого продифференцируем ее по a_0, a_1, a_2 и приравняем производные нулю.

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m [K(t)_i - \varphi(K_i; a_0, a_1, a_2)] \left(\frac{d\varphi}{da_0} \right)_i &= 0; \\ \sum_{i=1}^m [K(t)_i - \varphi(K_i; a_0, a_1, a_2)] \left(\frac{d\varphi}{da_1} \right)_i &= 0; \\ \sum_{i=1}^m [K(t)_i - \varphi(K_i; a_0, a_1, a_2)] \left(\frac{d\varphi}{da_2} \right)_i &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (61)$$

где $d\varphi/da = \varphi'(K_i; a_0, a_1, a_2)$ - значение частной производной функции φ по параметрам a_0, a_1, a_2 в точке K_i .

Решить вышеприведенную систему уравнений в общем виде нельзя, для этого надо задаться конкретным видом функции $K(t)$. Например, при линейной аппроксимации с отрицательным трендом для средней кривой на рис.30 уравнение сглаживающего полинома состоит всего из двух слагаемых:

$$K(t) = a_0 + (a_1 t).$$

Решим систему уравнений:

$$a_1 = \frac{M(t, K)}{\sigma_t^2}; \quad a_0 = K_{cp} - a_1 t_{cp},$$

где K_{cp} и t_{cp} - средние значения K и t по выборке из m точек.

При использовании полинома 2-й степени, т. е. когда нужно описать совокупность значений параметров параболой 2-го порядка

$$K(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2,$$

коэффициенты a_0, a_1, a_2 находят из преобразованного выражения:

$$\left. \begin{aligned} M_4(t)a_2 + M_3(t)a_1 + M_2(t)a_0 &= M_{2,1}(K, t); \\ M_3(t)a_2 + M_2(t)a_1 + M_1(t)a_0 &= M_{1,1}(K, t); \\ M_2(t)a_2 + M_1(t)a_1 + M_0(t)a_0 &= M_{0,1}(K, t); \end{aligned} \right\}, \quad (62)$$

где $M(t) = \sum_{i=1}^m \frac{t_i}{m}$ - момент 1-го порядка (математическое ожидание);

$M_2(t) = \sum_{i=1}^m \frac{t_i^2}{m}$ - момент 2-го порядка (дисперсия);

$M_3(t) = \sum_{i=1}^m \frac{t_i^3}{m}$ - момент 3-го порядка;

$M_{2,1} = (\sum_{i=1}^m t_i^2 K_i)/m$, $M_{1,1} = (\sum_{i=1}^m t_i K_i)/m$, $M_{0,1} = (\sum_{i=1}^m K_i)/m$ - смешанные центральные моменты совокупностей точек.

Обращаю внимание, что первоначальный выбор степени n при аппроксимации статистических данных полиномом n -го порядка осуществляется "на глаз" по виду поля экспериментальных точек или исходя из физических представлений процесса. В дальнейшем эта степень может быть уточнена в зависимости от получаемой погрешности:

$$\Delta = \sum_{i=1}^m (a_0 + a_1 t + \dots + a_n t^n - K_i)^2. \quad (63)$$

В случае, если средняя квадратическая погрешность $\sigma = \sqrt{\Delta/m}$ мала по сравнению с K_{max} , то аппроксимация допустима.

Выше рассмотрен метод экстраполяции. Вывод: экстраполяционные методы прогнозирования основной упор делают на выделение наилучшего в некотором смысле описания тренда и на определение прогнозных значений путем его экстраполяции. Методы экстраполяции во многом пересекаются с методами прогнозирования по регрессионным моделям. Иногда их различия сводятся лишь к различиям в терминологии, обозначениях или написании формул. Тем не менее сама по себе прогнозная экстраполяция имеет ряд специфических черт и приемов, позволяющих причислять ее к некоторому самостоятельному виду методов прогнозирования.

РАЗДЕЛ V. ПРИКЛАДНЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ АТ

Лекция 9. Организация служб диагностики в подразделениях ГА[23]. Информационное обеспечение процессов диагностирования АТ [1].

В зависимости от класса, оснащенности, территориального расположения авиационно-технических баз (АТБ), приписного парка, наличия материальной базы в авиакомпаниях ГА организованы: лаборатории надежности и технического диагностирования (производственные участки АТБ); базовые лаборатории диагностирования; группы диагностирования АТБ.

Лаборатории (производственные участки) надежности и технического диагностирования, базовые лаборатории и группы диагностирования организуются для диагностического надзора и прогнозирования состояния авиационной техники на предстоящий период работы. Лаборатория диагностирования – самостоятельное структурное производственное звено АТБ и в своей деятельности руководствуется:

- Приказами и руководящими указаниями авиационных властей;
- перспективными планами развития;

- Приказами и руководящими указаниями руководства авиапредприятия;
- руководящими документами по летной и технической эксплуатации АТ в ГА;

- регламентами, технологическими указаниями, бюллетенями и другой нормативно-технической документацией;

- Положением о лаборатории диагностирования данной АТБ;

- должностными инструкциями.

Инженерный состав АТБ авиапредприятия своевременно представляет в лабораторию диагностирования информацию о техническом состоянии ВС.

Задачи лаборатории диагностики

Лаборатории диагностирования эксплуатационных авиапредприятий решают следующие задачи:

1. Организуют и обеспечивают учет и обработку информации о неисправностях АТ, статистический анализ надежности АТ с оценкой эффективности доработок;

2. Подготавливают статистическую информацию для разработки предложений и мероприятий, направленных на обеспечение надежности и повышение эффективности использования АТ;

3. Осуществляют оперативный контроль, диагностирование и прогнозирование технического состояния приписного парка АТ;

4. Разрабатывают оперативные рекомендации по эксплуатации конкретных изделий АТ на основании анализа информации об их техническом состоянии;

5. Накапливают и обобщают данные по техническому состоянию АТ, опыту применения в эксплуатации и совершенствованию методов контроля, диагностирования и прогнозирования технического состояния АТ, методов учета и анализа информации о неисправностях АТ;

6. Участвуют в подготовительных работах АТБ по организации измерений параметров конкретных ВС в полете, при ТО и оценке технического состояния ВС;

7. Обрабатывают и анализируют данные об изменениях значений параметров двигателей и других систем ВС, измеряемых в полете и при ТО; оценивают техническое состояние и осуществляют контроль за выработкой ресурса ВС;

8. Разрабатывают рекомендации по дальнейшей эксплуатации АТ.

Источниками информации для работы лаборатории являются данные, получаемые при наземном техническом обслуживании и отраженные в карточках учета неисправностей (КУН) и формулярах; замечания экипажей о работе ВС в полете; результаты диагностических работ; карты параметров ВС в полете; записи МСРП.

Состав лаборатории надежности и диагностики

Для решения стоящих перед лабораторией диагностики задач и выполнения ею своих функций типовая лаборатория имеет структуру, показанную на рис.31.

Непосредственно в состав лаборатории (участка) надежности и диагностики входят группы: *надежности; параметров; масла, МНК; анализа. Группа учета и анализа информации о надежности* приписного парка изделий (группа надежности) осуществляет:

- организацию и обеспечение учета и обработки информации о неисправностях АТ;
- анализ надежности АТ;
- систематизацию материалов по опасным и наиболее часто повторяющимся отказам;
- ведение рекламационной работы.

Группа сбора и обработки информации о значениях параметров двигателей и других изделий (группа параметров) выполняет:

- сбор информации об изменениях значений уровня вибрации, термодинамических параметров двигателей и параметров других систем ВС в полете и при ТО, получаемых средствами ручной записи;

- систематизацию и первичную обработку информации об изменении значений параметров двигателей и других систем ВС;
- подготовку и передачу материалов для обработки на ЭВМ, получение и анализ обработанных данных;
- участие в расшифровке и анализе автоматических бортовых записей значений параметров в части, относящейся к ТС АТ;
- передачу данных в группу анализа информации.



Рис.31. Типовая структура лаборатории диагностики и взаимодействия ее с другими подразделениями эксплуатационного предприятия

Группа анализа масла двигателей и трансмиссии ТВД и вертолетов и спецжидкостей (группа масла) выполняет:

- отбор проб масла и спецжидкостей, проведение анализа проб для определения концентрации в них продуктов изнашивания, регистрацию, обработку и систематизацию результатов анализов;

- передачу данных в группу анализа информации.

Группа неразрушающих методов контроля (группа МНК) производит:

- проверку ТС деталей изделий АТ с применением дефектоскопов, эндоскопов и других средств МНК;

- оценку ТС деталей изделий АТ на основании проведенных проверок;

- передачу данных в группу анализа информации.

Группа анализа информации и выдачи оперативных рекомендаций по эксплуатации АТ осуществляет:

- ведение и хранение дел воздушных судов и дел двигателей;

- анализ ТС и систем ВС приписного парка с использованием статистических данных, получаемых из группы надежности;

- комплексный анализ ТС ВС по материалам дела воздушного судна и дела двигателя на основе информации, получаемой из всех звеньев авиационного предприятия;

- формирование рекомендаций по дальнейшей эксплуатации ГТД и других изделий АТ.

Со второй частью лекции «Информационное обеспечение процессов диагностирования АТ» можно ознакомиться в 5 главе учебного пособия автора [1], где качественно новой ступенью в информационной диагностике является разработка и создание систем информационного обеспечения процессов диагностирования (СИОПД), куда наряду с блоками накопления информации заложены алгоритмы принятия решений.

Лекция 10. Характеристики прикладных методов диагностики АТ [1]

Материал данной лекции взят и читается студентам на основе раздела 3.1. «Методы диагностики АТ и их возможности» учебного пособия

«Диагностика авиационной техники (информационные основы), написанное автором в 2007 г. Ниже приводятся выдержки из текста пособия.

В настоящее время широко распространены и значительно развиты методы и средства диагностики, основанные на различных физических принципах, позволяющие охватить контролем наиболее ответственные узлы, агрегаты и системы. Условно их можно разделить на методы прямых измерений структурных диагностических параметров, определяющих техническое состояние АТ, и методы безразборной (оперативной) диагностики по косвенным параметрам. В качестве косвенных используют диагностические параметры, содержащие информацию об изменении структурных характеристик состояния деталей АТ. Эти методы [24] позволяют получить достаточно точные результаты оценки, например, износа отдельных элементов газотурбинных двигателей (ГТД).

К основным из используемых и перспективных методов оперативной диагностики ГТД относят:

- диагностику по результатам анализа термогазодинамических параметров;
- диагностику по тепловым параметрам;
- по виброакустическим параметрам;
- трибодиагностику;
- оптико-визуальную диагностику;
- анализ продуктов сгорания;
- измерение выбега ротора.

Применение каждого из методов осуществляется с помощью диагностического оборудования. Так, например, для анализа состава примесей в масле используют различные по сложности и принципам действия средства - от простейших магнитных пробок, установленных в магистралях маслосистемы двигателя, до сложных спектроанализаторов.

Диагностика неисправностей по тепловым параметрам предусматривает получение информации как от термодатчиков (термопреобразователей), так

и от фотоэлектрических пирометров и тепловизоров, в последнее время успешно внедряемых в диагностической практике.

Контроль виброакустических параметров предполагает применение различных типов вибропреобразователей и сигнальной аппаратуры. Разрабатываются методы оценки напряженности конструктивных элементов с помощью голографических установок (создание т.н. «вибропортретов») [25].

Подчас обнаружение неисправностей упомянутыми методами требует создания достаточно сложного математического аппарата, позволяющего идентифицировать признаки с конкретными дефектами.

Относительное многообразие методов объясняется тем, что ни один из них не позволяет учесть все требования, предъявляемые к формированию диагноза со 100% достоверностью, поскольку они несут специфическую информацию разной ценности. Ни один из методов не позволяет оценить состояние двигателя с достаточной степенью детализации. С помощью сочетания ряда методов можно осуществить более глубокий контроль (как правило, на земле), однако, это часто требует специальных условий и продолжительного времени.

В качестве примера остановимся на методах диагностики авиационных ГТД (рис.32), являющихся наиболее сложными объектами АТ. Условно их можно разделить на методы прямых измерений структурных диагностических параметров, определяющих техническое состояние ГТД, и методы безразборной (оперативной) диагностики по косвенным параметрам. В качестве косвенных используют диагностические параметры, содержащие информацию об изменении структурных характеристик состояния двигателя. Эти методы [24] позволяют получить достаточно точные результаты оценки, например, износа отдельных элементов. Однако их применение затруднено низкой технологичностью ГТД и в большинстве случаев вызывает необходимость разборки двигателя. Это снижает достоверность контроля, поскольку состояние любого технического объекта после разборки не

адекватно его состоянию до этих процедур, и в процессе эксплуатации разборка ГТД в большинстве случаев не представляется возможной.

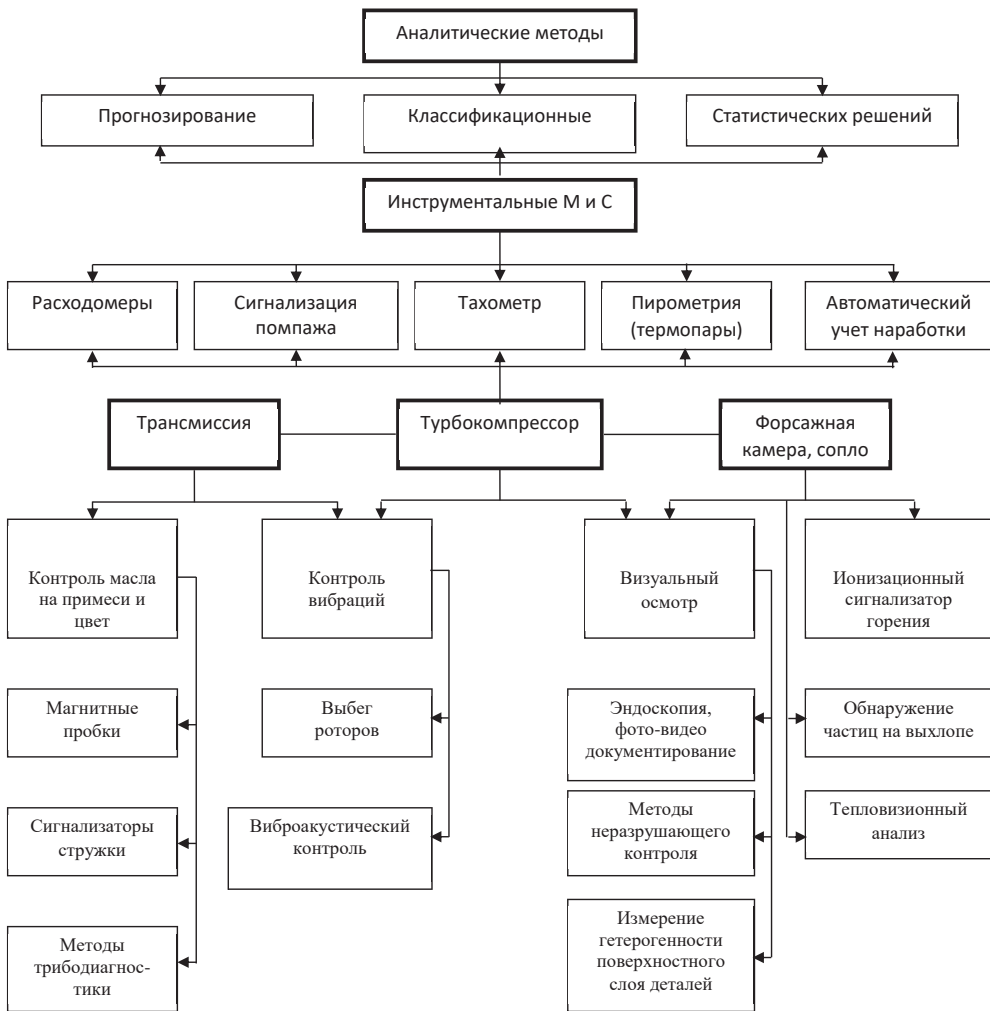


Рис.32. Методы и средства диагностики ГТД

Методы оперативной диагностики по косвенным параметрам лишены перечисленных недостатков, хотя в настоящее время они не всегда позволяют локализовать место дефекта.

В рамках одной лекции весьма трудно изложить материал по методам диагностики, широко используемых при ТО авиационных ГТД. Поэтому остановлюсь лишь на методах трибодиагностики, которые в соответствии с рабочей программой дисциплины включены в перечень лабораторных работ. Лекции по другим методам инструментальной диагностики будут читаться в 8-м семестре в рамках дисциплины Техническая диагностика и неразрушающий контроль

Трибодиагностика авиационных ГТД.

Триболо́гия — наука, раздел физики, занимающийся исследованием и описанием контактного взаимодействия твёрдых деформируемых тел при их относительном перемещении. Процесс разрушения изнашиваемых деталей, как правило, начинается с разрушения поверхностного слоя материала под действием высоких динамических напряжений, что проявляется в виде отрывов частиц материала [26]. Это приводит к повышенной концентрации напряжений в местах отрыва и как следствие к дальнейшему развитию процесса разрушения. При этом продукты износа уносятся маслом, циркулирующим в двигателе. Их наличие и накопление могут служить сигналом о возникновении неисправности.

Масло в данном случае является носителем информации о состоянии трущихся пар. Как показывает опыт, отрезок времени от начала процесса разрушения поверхностного слоя до момента полного разрушения детали, как правило, достаточно велик, что дает возможность обнаруживать неисправности уже на начальном этапе процесса изнашивания.

Количество и форма продуктов износа, поступающих в масло, зависит от скорости накопления частиц износа.

В процессе эксплуатации ГТД можно выделить три основных этапа: приработка (1 уч.), период стабильного изнашивания (2 уч.), период аварийного изнашивания (3 уч.) (Рис.33).

На этапе приработки в качестве продуктов износа в масло поступают в основном частицы, образуемые при обламывании микрорельефа, оставляемого режущим инструментом при механической обработке деталей двигателя. Удельная концентрация этих частиц может достигать 2,0-2,5 г/т, они имеют размер до нескольких десятков микрон и характерную продолговатую форму. Для трибодиагностики данный период работы двигателя наименее интересен, поскольку в процессе приработки двигатель и так находится под повышенным контролем.

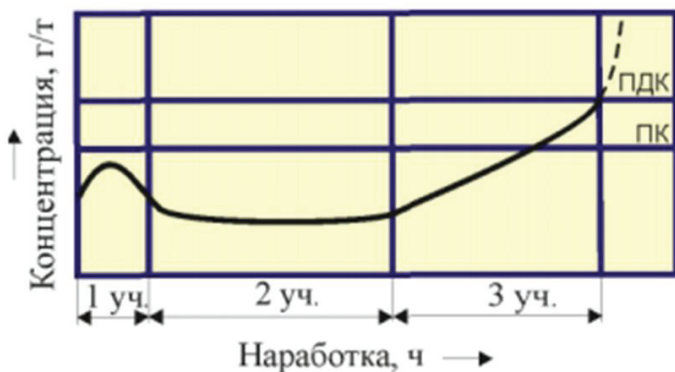


Рис.33. Распределение Лоренца - содержания металлов в масле в процессе наработки ГТД

Периодом стабильного изнашивания (2 уч.) двигателя считается период, когда каждая из омываемых маслом трущихся пар выделяет в масляную систему двигателя только частицы, которые можно охарактеризовать как «частицы нормального износа». Для этих частиц характерен небольшой размер (до 10 мкм) и специфическая форма чешуек. Этот период примечателен тем, что масляная система авиадвигателя представляет собой упорядоченную систему, где четко прослеживается взаимосвязь ее составляющих - удельных

концентраций отдельных металлов. По 10-12 пробам можно контролировать на качественном уровне любое изменение состояния кинематической системы, причем здесь не является помехой ни выгорание, ни долив, ни даже полная замена масла. Эти факторы имеют первоочередное значение при измерении удельных концентраций, но при оценке состояния ГТД с точки зрения взаимосвязи примесей, их роль сводится на нет. Если рассмотреть значения удельных концентраций измеряемых металлов при различных наработках в качестве массива случайных величин, можно наблюдать характерную закономерность. После окончания периода приработки в масляной системе двигателя взаимная корреляция величин удельных концентраций принимает стабильное значение, как правило, от 0,2 до 0,8 г/т. Это значение остается практически неизменным при сохранении характера процессов изнашивания в омываемых маслом трущихся парах. Но появление в кинематической цепи трущейся пары с повышенным, а затем и с аномальным износом приводит к тому, что роль данной пары возрастает на несколько порядков. Это приводит к изменению общей картины протекания процесса. Коэффициенты корреляций принимают близкие к нулю значения, из чего делается вывод, что изменился характер связей элементов в системе. Таким образом, установившиеся в процессе эксплуатации взаимные корреляции металлов примесей становятся после набора статистики наиболее информативной его характеристикой.

Наибольший интерес вызывает момент времени, когда начинается следующий период - период разрушения. В период повышенного износа в масляную систему начинают поступать частицы, характерные для конкретной разрушающейся пары. Они могут относиться к самым разным типам частиц (микрорезание, выкрашивание, задиры при качении или скольжении), но при этом масса каждой из частиц существенно превосходит массу частицы нормального изнашивания отслаиванием.

В узлах трения машин, в том числе авиационных двигателей, наблюдаются следующие виды изнашивания рабочих поверхностей контактирующих деталей [2]:

- изнашивание истиранием (отслаиванием) - обычное (нормальное) изнашивание поверхностей при скольжении. Такой вид износа характерен при нормальных условиях работы узла трения, когда большинство частиц изнашивания имеет форму пластин различной толщины и размера (рис.34).

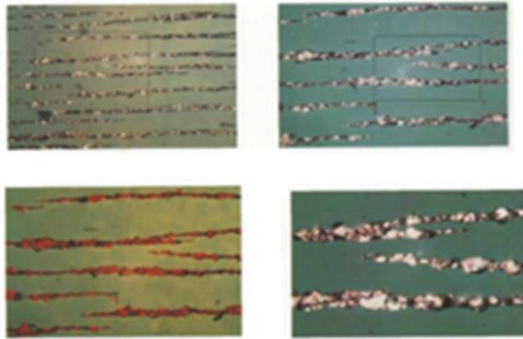


Рис.34. Микрофотографии частиц при нормальном износе
Увеличение: 500х

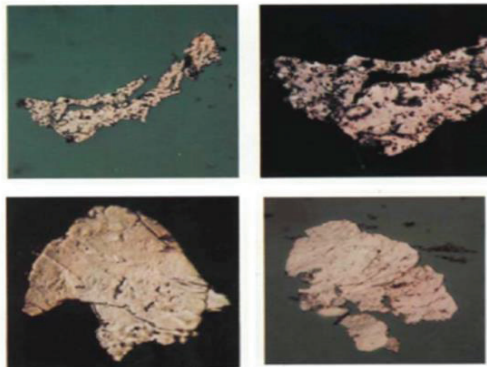


Рис.35. Микрофотографии частиц износа
при усталостном выкрашивании (ув.500х)



Рис. 36. Микрофотографии частиц износа при микрорезании (ув.500х)

- микрорезание - частицы изнашивания при микрорезании образуются в результате внедрения одной поверхности в другую. При этом частицы имеют форму, аналогичную мелкой металлической стружке, получаемой при механической обработке металлов резанием, только они значительно меньших размеров. Признаны две версии образования частиц при данном виде изнашивания. По первой версии - острая микронеровность одной поверхности трения внедряется в другую. При этом образуются частицы изнашивания длиной 20-100 мкм и толщиной 2-5 мкм, имеющие неровную, “рваную” поверхность (рис. 36).

По второй версии твердые абразивные частицы, присутствующие в маслосистеме в виде загрязнений (песок или частицы изнашивания из других узлов трения), могут внедряться в мягкие поверхности деталей узлов трения, например, в поверхности подшипников скольжения. При этом внедрившиеся частицы будут выступать и внедряться в противоположную поверхность трущейся пары.

- усталостное выкрашивание при трении качения- обусловлено при трении качения в подшипниках и зубчатых зацеплениях. Такой вид процесса износа можно разделить на три этапа: пластическое деформирование поверхностей трения, образование усталостных микротрещин и развитое усталостное выкрашивание (рис.35). При этом образуются в основном три типа усталостных частиц: частицы в виде хлопьев, пластинчатые частицы и сферические частицы [27].

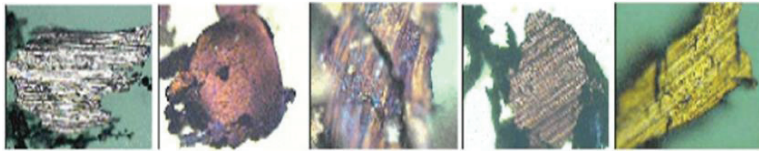


Рис.37. Микрофотографии частиц износа при задире (ув.500х)

- частицы износа, образующиеся при задире - заدير при скольжении начинается в условиях нарушения гидродинамического и граничного слоев смазки, когда напряжение на поверхности изнашивания, обусловленные нагрузкой и скоростью, становятся чрезмерно высокими. Срезаемый разнородный слой после этого становится нестабильным, и образуются большие частицы изнашивания, что приводит к увеличению скорости изнашивания (рис.37).

Если усилия, приложенные к поверхности, продолжают увеличиваться, то наступает 2-ой период изнашивания, когда вся поверхность разрушается и катастрофически растет скорость износа.

Отношение количества больших частиц к количеству малых зависит от того, насколько напряжения на поверхность превышают предельные значения. Более высокому значению напряжений соответствует и более высокое значение этого отношения.

Если уровень напряжений возрастает медленно, то можно заметить значительное увеличение количества частиц изнашивания отслаиванием, что предшествует образованию больших частиц, образующихся при задире.

Размер частиц в случае задира при скольжении находится на уровне 200 мкм. Некоторые из этих частиц в результате скольжения имеют шероховатую поверхность. Часто по контуру у них края заостренные, а отношение их большего размера к толщине составляет примерно 10:1. Так как при этом виде изнашивания частицы становятся более крупными, то шероховатость и острые края частиц становятся более заметными.

Задир поверхностей трения происходит со значительным выделением тепла и повышением температуры в зоне контакта, что приводит к изменению цвета частиц при их наблюдении на оптическом микроскопе в белом падающем свете, т.е. на частицах появляются цвета побежалости. Степень окисления частиц изнашивания зависит от смазки и от интенсивности заедания.

Наиболее распространенные методы трибодиагностики, к которым относятся - магнитный метод, метод спектрального анализа и др., предназначенные для выявления металлических частиц в эксплуатационных пробах масла, достаточно подробно изложены в методических указаниях по выполнению лабораторных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Машошин О.Ф. Диагностика авиационной техники. – М.: МГТУ ГА, 2007. 141 с.
2. Пивоваров В.А. Повреждаемость и диагностирование авиационных конструкций. -М.: Транспорт, 1994.
3. Пивоваров В.А., Хрустиков С.Г., Коротков В.А. Диагностика повреждаемости авиационных конструкций. –М.: МГТУ ГА, 2008. 74 с.
4. Техническая эксплуатация летательных аппаратов /Под ред. Н. Н. Смирнова. М.: Транспорт, 1990. 423 с.
5. Партон В. З. Механика разрушения. От теории к практике. М.; Наука, 1998. 239 с.
6. Крылов К. А., Хаймзон М. Е. Долговечность узлов трения само-летов. М.: Транспорт, 1976. 183 с.
7. Волькенштейн М. В. Энтропия и информация. М.: Наука, 1986. 211 с.
8. Пивоваров В.А. Прогрессивные методы технической диагностики. -М.: МГТУГА, 1999.
9. Пивоваров В.А., Машошин О.Ф., Хрустиков С.Г., Санников А.В. Диагностика и неразрушающий контроль летательных аппаратов и авиадвигателей. – М.: МГТУ ГА, 2011. 89 с.
10. Машошин О.Ф. Инструментальные методы диагностики авиационной техники. – М.: МГТУ ГА, 2010.115 с.
11. ГОСТ 26656-85. Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования.
12. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения.
13. Александров В.Г., Майоров А.В., Потюков Н.П. Авиационный технический справочник. - М.: Транспорт, 1975.
14. Смирнов Н.Н., Чинючин Ю.М. Эксплуатационная технологичность летательных аппаратов. -М.: Транспорт, 1994.
15. Биргер И.А. Техническая диагностика.- М.: Машиностроение, 1978.

16. Лозицкий Л.П., Янко А.К., Лапшов В.Ф. Оценка технического состояния авиационных ГТД. -М.: Воздушный транспорт, 1982.
17. Бонгард М.М. Проблема узнавания.- М.: Наука, 1967.
18. Климонтович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем т 1. -М.: ТОО «Янус», 1995.
19. Nielsen M.A., Chuang I.L. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press. Internat inf. 2001.
20. Стратонович Р.Л. Теория информации. -М.: Сов. радио, 1975.
21. Холево А.С. Введение в квантовую теорию информации.- М.: МЦНМО, 2002.
22. Шеннон К.Э. Работы по теории информации и кибернетике. Под ред. Р.Л.Добрушина, О.Б.Лупанова. -М.: Изд-во иностр. литер., 1963.
23. В.И. Ямпольский и др. Контроль и диагностирование гражданской авиационной техники. – М.: Транспорт, 1990.
24. Крылов К.А., Хаймзон М.Е. Долговечность узлов трения самолетов. -М.: Транспорт, 1976.
25. Кольер Р., Берхарт Д., Лиин Л. Оптическая голография. – М.: Мир, 1973.
26. Ермаков Г.И. Диагностирование технического состояния АД путем анализа работавшего масла. - М.: Изд-во МГА, 1985.
27. Степанов В.А. Диагностика технического состояния узлов ГТД по параметрам продуктов износа в масле. – Рыбинск: ЦИАМ, 2002.232 с.