

СТАУ: 6(У)
М152

САМАРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
имени академика
С.П. КОРОЛЕВА



И.М. МАКАРОВСКИЙ,
О.Н. МАТЕЙКО

ОСНОВЫ
ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ
ДИАГНОСТИКИ
АВИАЦИОННОЙ
ТЕХНИКИ

САМАРА 2001

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА

И.М. МАКАРОВСКИЙ, О.Н. МАТЕЙКО

ОСНОВЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ
ДИАГНОСТИКИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Учебное пособие

Г **ХРАНЕНИЕ**

Самарский Государственный
Аэрокосмический университет
№ 653865
Научно-техническая
библиотека

САМАРА 2001

УДК 629.7.017.004

Основы эксплуатационной диагностики авиационной техники: Учеб. пособие / *И.М. Макаровский, О.Н. Матейко*. Самар. гос. аэрокосм. ун – т. Самара, 2001. 79 с.

ISBN 5-7883-0173-6

Рассматриваются вопросы, связанные с разработкой и применением систем технического диагностирования (ТД) авиационной техники (АТ) при ТО и Р. Изложены теоретические основы методов определения и прогнозирования технического состояния (ТС) объектов, а также поиска неисправностей (дефектов).

Пособие подготовлено на кафедре ЭЛАиД в соответствии с учебной программой по дисциплине "Техническая эксплуатация ЛА и авиационных двигателей" и предназначено для студентов специальности 130 300.

Ил. 21. Библиогр.: 4 назв.

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

Рецензенты: В.Н. Шубин, Н.Н. Игонин

ISBN 5-7883-0173-6 © И.М. Макаровский,
О.Н. Матейко, 2001
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2001

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Общая характеристика системы ТД АТ.....	4
2. Основные термины и определения технической диагностики.....	6
3. Контролепригодность АТ.....	8
4. Классификация систем ТД.....	13
5. Информативность систем ТД.....	16
6. Надежность результатов ТД.....	19
7. Достоверность результатов ТД.....	22
8. Диагностические признаки и параметры.....	24
9. Комплексные диагностические признаки.....	28
10. Распознавание ТС объектов с использованием комплексных диагностических признаков.....	30
11. Интегральные диагностические параметры.....	31
12. Структура ТД при проверке работоспособности объектов.....	34
13. Граничные значения диагностических параметров.....	36
14. Особенности ТД многофункциональных объектов.....	40
15. Алгоритм ТД многофункциональных объектов.....	44
16. Прогнозирование ТС объектов.....	46
17. Прогнозирование ТС объектов с учетом степени перемешивания реализаций диагностических параметров.....	48
18. Диагностирование по тенденции изменения диагностических параметров.....	51
19. Использование прогнозных моделей при анализе тенденции изменения диагностических параметров.....	54
20. Поиск неисправностей (дефектов).....	57
21. Рабочие алгоритмы поиска неисправностей (дефектов).....	61
22. Поиск неисправностей (дефектов) функциональных систем.....	64
23. Общая характеристика бортовых средств ТД.....	68
24. Общая характеристика средств локального ТД.....	72
Рекомендуемая литература.....	78

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМЫ ТД АТ

Эксплуатационная диагностика АТ занимается решением широкого круга задач, связанных с определением ТС изделий в процессе ТОиР. Проблема ТД АТ относится к числу наиболее актуальных проблем ТЭ, так как на долю работ, связанных с проверкой работоспособности и поиском неисправностей (дефектов), приходится более половины общей трудоемкости ТО и Р и до 90 % времени простоя ЛА при устранении неисправностей.

Низкая эффективность работ во многом объясняется тем, что при создании АТ недостаточное внимание уделяется вопросам обеспечения контролепригодности изделий, а также организации эффективных процедур ТД. Недостаточный уровень контролепригодности приводит к необходимости применения малоэффективных ручных средств контроля и интуитивных методов распознавания ТС изделий, которые не в состоянии гарантировать получение оперативной и достоверной диагностической информации. В то же время потребности в такой информации в условиях непрерывного усложнения АТ и высокой интенсивности использования ЛА постоянно возрастают. Наиболее высокие требования к качеству диагностической информации предъявляются при переводе АТ на стратегии ТО и Р по состоянию.

Получение диагностической информации в процессе эксплуатации АТ осуществляется путем комплексного использования бортовых (встроенных) и наземных (внешних) средств контроля, которые образуют единую систему ТД ЛА (рис. 1).

Характерной особенностью применения данной системы является комплексное использование диагностической информации, получаемой как в полете, так и при выполнении ТО и Р. С целью повышения эффективности системы в крупных АТБ и ремонтных заводах созданы и успешно функционируют специализированные лаборатории диагностики (ЛД).

Лаборатории занимаются решением широкого круга вопросов, связанных с проверкой работоспособности и поиском

дефектов АТ, а также с внедрением современных методов и средств ТД в технологические процессы ТО и Р. В задачи лаборатории также входит сбор и обобщение информации об изменении ТС и надежности АТ, разработка рекомендаций по корректировке режимов ТО и Р, а также разработка (совершенствование) средств диагностирования. По мере накопления опыта работы функции лаборатории постоянно расширяются. На определенном этапе значительная часть работ, выполняемых техническим отделом, ОТК и другими звеньями АТБ, будет передана ЛД, которые преобразуются в диагностические центры. Они возьмут на себя все функции, связанные с управлением ТС и надежностью АТ. Производственные цехи и участки будут выполнять при этом стандартные работы по ТО и Р, а также работы по указанию диагностических центров.

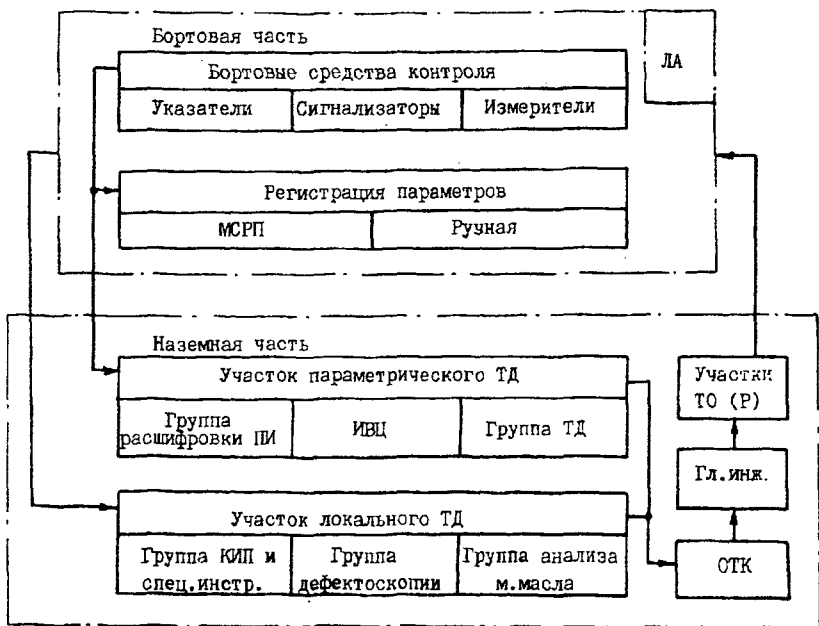


Рис 1. Структура системы ТД ЛА

Структурная перестройка системы ТД АТ сегодня связывается с перестройкой всей системы ТЭ, что обусловлено переводом большой номенклатуры изделий на эксплуатацию по техническому состоянию (ТЭС). Важное место в структурной перестройке системы отводится подготовке инженерных кадров, способных решать вопросы, связанные с созданием и применением эффективных систем ТД.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Техническая диагностика представляет собой раздел знаний (науку), занимающуюся исследованием ТС объектов ТД и их проявлений, разработкой методов и средств ТД, а также общих принципов построения и применения систем ТД. Термины и определения основных понятий технической диагностики, а также порядок и нормативы, принятые при разработке и применении систем ТД, изложены в соответствующих стандартах (ГОСТах).

В соответствии с ГОСТом под "техническим состоянием (ТС)" понимается совокупность подверженных изменению в процессе эксплуатации свойств объекта ТД, характеризующая признаками, установленными соответствующей нормативно-технической документацией. В качестве диагностических признаков и параметров (ДП) используются качественные (дымление, тряска, подтекание жидкостей и т.д.) и количественные (размеры, вес, температура, давление и т.д.) характеристики свойств объектов.

Наряду с понятием ТС в технической диагностике используется термин «вид технического состояния» (ВТС). Под ВТС понимается совокупность ТС, удовлетворяющих (не удовлетворяющих) требованиям исправности, работоспособности или правильности функционирования объекта. Объект ТД может иметь практически бесконечное число ТС и только шесть ВТС (исправное-неисправное, работоспособное-нерботоспособное, правильного-неправильного функционирования).

Для определения ВТС необходимо знание:
фактического ТС объекта, определяемого путем ТД;
требований (условий), определяющих ВТС объекта;
результатов сопоставления фактического ТС объекта с требованиями (условиями), определяющими его ВТС.

Задачи определения ВТС, как правило, решаются с использованием соответствующих систем контроля. Однако в случае дифференцированного контроля (по отдельным ДП) задача определения ВТС может быть решена и системой ТД. Так, например, при определении правильности функционирования обратного клапана достаточно проверить его способность пропускать жидкость только в одном направлении (задача ТД).

Под "техническим диагностированием (ТД)" понимается процесс определения ТС объекта с заданной точностью (надежностью, достоверностью или глубиной поиска дефекта). Результатом ТД служит "технический диагноз" - заключение о ТС (ВТС) объекта с указанием (при необходимости) места, вида и причины возникновения неисправности (дефекта).

Вероятность подтверждения ТС объекта характеризует надежность результата ТД, а вероятность правильного определения ТС - достоверность результата ТД.

Степень детализации поиска дефектов (система-агрегат-узел-деталь) характеризует глубину поиска (глубину ТД).

Диагностирование обычно осуществляется с использованием тех или иных средств ТД в соответствии с алгоритмом ТД. К средствам ТД относятся разнообразные контрольно-измерительные приборы, генераторы тестовых воздействий, устройства для накопления и обработки диагностической информации, поверяющие тесты и т.д. Алгоритм ТД представляет собой совокупность предписаний о составе и очередности проведения элементарных проверок, а также правил расшифровки их результатов.

Каждая элементарная проверка определяется составом рабочих и (или) тестовых воздействий, подаваемых на объект с целью ТД, а также составом ДП, образующих ответ (реакцию) на подаваемые воздействия. Результаты элементарных проверок представляются в количественной (в виде текущих

значений ДП) или в качественной (в виде ответов "да-нет", "больше-меньше" и т.д.) форме.

Качество алгоритма во многом определяет эффективность ТД, которая характеризуется числом элементарных проверок, временем (трудоемкостью) и стоимостью работ, необходимых для распознавания ТС объекта. В силу этого при их разработке обычно предполагается минимизация затрат, связанных с проведением ТД, что связывается с необходимостью использования формальных методов оптимизации процессов, базирующихся на математических моделях объектов.

3. КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТЬ АТ

Эффективность ТД во многом зависит от уровня контролепригодности АТ. При этом под контролепригодностью объекта в общем случае понимается совокупность свойств его конструкции, определяющих приспособленность к диагностированию заданными средствами и, прежде всего, средствами бортового контроля.

С целью обеспечения контролепригодности АТ конструирование и изготовление изделий ведется с учетом стандартных требований, реализация которых обычно связывается с дополнительными затратами. Однако затраты по обеспечению контролепригодности АТ быстро окупаются в эксплуатации за счет повышения надежности изделий и снижения трудоемкости ТО и Р.

Различают бортовой и наземный уровни контролепригодности АТ. Первый характеризует соответствие свойств изделий требованиям эффективного ТД при выполнении полетов, а второй - при ТО и Р (рис. 2).

В процессе эксплуатации, как правило, рассматриваются комплексные характеристики контролепригодности, которые включают свойства конструкции изделия, а также систем его бортового и наземного контроля.

При оценке свойств конструкции, определяющих контролепригодность изделия, анализируется состав и размещение измерительных преобразователей (датчиков), устройств

сопряжения (разъемов) для подключения внешних средств контроля, а также доступность к местам контроля и удобство его проведения. При этом учитываются требования, предъявляемые к контролепригодности конструкций АТ.

При оценке свойств бортовых систем контроля анализируется состав контролируемых и регистрируемых в полете параметров, точность измерений, а также эргономические характеристики индикаторов (указателей). При этом учитываются требования, предъявляемые к бортовым системам контроля АТ.

При оценке свойств наземных средств контроля анализируется состав контролируемых параметров, характеристики используемой аппаратуры, а также затраты труда, времени и средств на проведение ТД. При этом учитываются требования, предъявляемые к средствам наземного контроля АТ.

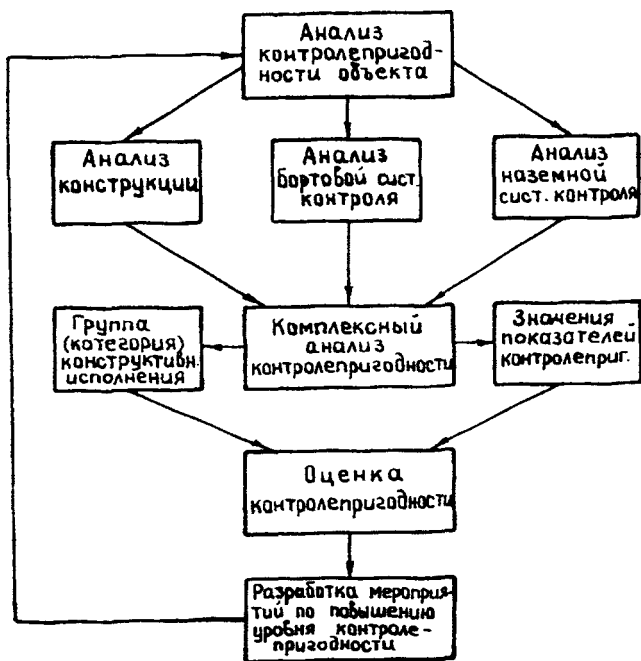


Рис. 2. Структура работ по оценке контролепригодности АТ

С целью оперативного управления свойствами АТ проводятся качественные и количественные оценки контролепригодности АТ.

Качественная оценка проводится путем сопоставления свойств изделий с требованиями нормативно-технической документации. Уровень контролепригодности изделия при этом характеризуется соответствием категории (группы) его конструктивного исполнения и процентом соответствия стандартным требованиям к его контролепригодности.

Стандартом устанавливается 6 категорий (групп) конструктивного исполнения изделий по контролепригодности, которые отличаются по используемым средствам контроля (встроенные, внешние), характеру работ по подготовке объекта контроля (вскрытие лючков, панелей, установка технологических переходников и т.д.), способу сопряжения объекта со средствами контроля (бортовые разъемы) и степени унификации контролируемых параметров (с введением или без введения дополнительных датчиков). Так, изделия АТ, как правило, относятся к четвертой группе контролепригодности.

Положительная оценка уровня контролепригодности дается в случае подтверждения группы конструктивного исполнения и соответствия требованиям контролепригодности не менее чем на 90 %.

Количественная оценка проводится с использованием ряда обобщенных и единичных показателей. К обобщенным, в частности, относятся показатели полноты бортового контроля $K_{п}$ и трудоемкости наземного контроля $K_{т}$, которые вычисляются по формулам:

$$K_{п} = 1 - \frac{P_{нк}}{P_{нк} + P_{бк}},$$

где $P_{нк}$ и $P_{бк}$ - соответственно число параметров объекта, контролируемых средствами наземного и бортового контроля;

$$K_T = 1 - \frac{T_{\text{всп}}}{T_{\text{всп}} + T_{\text{осн}}},$$

где $T_{\text{всп}}$ и $T_{\text{осн}}$ - соответственно трудоемкости вспомогательных (подготовительных) и основных (диагностических) операций, чел.-час.

К единичным относятся показатели унификации устройств сопряжения $K_{\text{ус}}$, унификации контролируемых параметров $K_{\text{уп}}$ и другие. Выбор номенклатуры показателей определяется задачами анализа контролепригодности. Методика выбора и расчета показателей подробно рассматривается в специальной литературе.

Оценка контролепригодности изделия проводится дифференцированным или интегральным методом.

Дифференцированная оценка проводится с использованием относительного показателя K_i :

$$\bar{K}_i = \frac{K_i}{K_{i\text{баз}}},$$

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

При $\bar{K}_i > 1$ для всех анализируемых показателей дается положительная, а при $\bar{K}_i < 1$ хотя бы для одного показателя - отрицательная оценка контролепригодности объекта.

Интегральная оценка проводится с использованием относительного показателя \bar{K}_Σ :

$$\bar{K}_\Sigma = \frac{K_\Sigma}{K_\Sigma^{\text{баз}}},$$

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

Расчет показателя K_{Σ} проводится по формуле:

$$K_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n K_i^{\alpha_i},$$

где K_i - значение i -го показателя контролепригодности;

α_i - коэффициент значимости i -го показателя;

n - число анализируемых показателей.

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

При расчете показателей K_i используются данные, полученные путем анализа методик ТД и хронометража работ, связанных с проведением проверок объекта.

По результатам оценок разрабатываются мероприятия, направленные на повышение контролепригодности объектов, которые делятся на конструктивные и технологические.

К конструктивным мероприятиям относятся: доработки конструкции изделий в направлении снижения трудоемкости основных и вспомогательных операций контроля (применение унифицированных датчиков, обеспечение подходов к точкам контроля, легкосъемности контролируемых элементов и т.д.), оснащение средствами сбора и обработки диагностической информации и т.д.

К технологическим (эксплуатационным) мероприятиям относятся: внедрение перспективных методов и средств наземного контроля, автоматизация работ, разработка оснастки и приспособлений, повышающих эффективность контроля, совершенствование метрологической службы предприятий, повышение квалификации исполнителей и т.д.

Наиболее высокой эффективностью отличаются решения, базирующиеся на комплексном использовании достижений технической диагностики и контролепригодности АТ. Эффективность планируемых мероприятий оценивается по ожидаемым изменениям показателей контролепригодности, а также группы конструктивного исполнения изделий.

4. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ТД

Под системой ТД понимается совокупность объекта, средств и алгоритма ТД, а также исполнителя (в случае ручной системы ТД), подготовленная или осуществляющая диагностирование по правилам, установленным нормативно-технической документацией. Каждое изделие вне зависимости от сложности и назначения в соответствии с ГОСТом оснащается системой ТД, обеспечивающей возможность проверки его исправности, работоспособности или правильности функционирования, а также поиск (при необходимости) типовых неисправностей (дефектов).

К разработке системы ТД обычно приступают на стадии макетной проработки изделия, а окончательное формирование системы происходит в ходе его серийной эксплуатации. На этапе эксплуатации ведутся работы по совершенствованию методов, средств и алгоритма ТД, автоматизации сбора и обработки диагностической информации, повышению контролепригодности изделия и т.д.

В зависимости от характера взаимодействия с объектом, используемых средств ТД и уровня автоматизации работ различают функциональные и тестовые, общие и локальные, встроенные и внешние, программные и аппаратурные, универсальные и специальные, автоматические и ручные системы ТД (рис. 3).

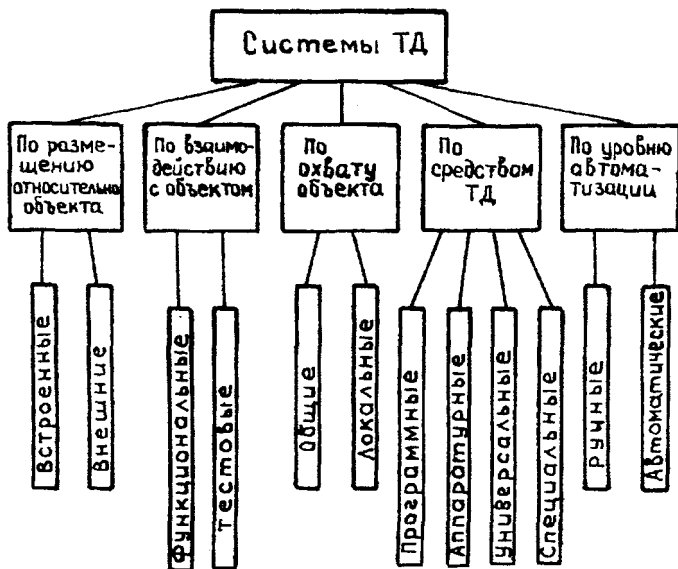


Рис. 3. Классификация систем ТД

Функциональные системы ТД применяются на работающих объектах. При проверках на объект поступают только те воздействия, которые предусмотрены его рабочим алгоритмом (изменение режима работы, открытие - закрытие кранов, отклонение органов управления и т.д.). Реакции объекта на подаваемые воздействия при этом обычно регистрируются по показаниям штатных приборов контроля.

Тестовые системы ТД применяются как на работающих, так и на неработающих объектах. При этом на объект кроме рабочих подаются и специальные (тестовые) воздействия (впрыск воды в проточную часть ГТД, срезка подачи топлива, воздействие физическими полями и т.д.). Тестовые воздействия формируются с помощью специальных устройств (тесто-

вых генераторов), входящих в состав системы. Реакции объекта на подаваемые воздействия при этом регистрируются по показаниям штатных приборов контроля, а также приборов, подключаемых к объекту на время ТД.

Общие системы ТД предназначаются для проведения проверок объектов в целом, а локальные - для их составных частей.

Встроенные системы ТД входят в состав объектов и используются совместно с ними, а внешние - подключаются к объектам только на время проведения проверок.

Программные системы ТД базируются на использовании специализированных программ (поверяющих тестов), которые вводятся в объект при проведении проверок, а аппаратные - на применении разнообразных контрольно-измерительных приборов, пультов, стендов и т.д.

Универсальные системы ТД применяются на разнообразных объектах, так как они базируются на универсальных средствах контроля (мерительный инструмент, средства дефектоскопии и т.д.), а специальные - на однотипных объектах, так как они базируются на специальных средствах контроля (стенды для проверки гидроусилителей, насосов, клапанов и т.д.).

Автоматические системы ТД осуществляют весь цикл диагностирования без вмешательства исполнителя, а ручные (автоматизированные) - требуют участия исполнителя во всех (части) операциях.

В настоящее время в практике эксплуатации ЛА широкое распространение получили наземные (внешние) автоматизированные системы ТД, базирующиеся на обработке записей полетной информации ("Анализ-86", "Контроль-8-2У" и др.). Новейшие типы самолетов (Ил-96, Ту-204 и др.) оснащены автоматическими бортовыми (встроенными) системами ТД, которые осуществляют проверку работоспособности и поиск неисправностей (дефектов) основных функциональных систем в полете.

5. ИНФОРМАТИВНОСТЬ СИСТЕМ ТД

При разработке систем ТД стремятся к тому, чтобы при минимальном числе элементарных проверок получить информацию, достаточную для определения ТС объекта. Каждая проверка несет некоторый объем информации, в силу чего неопределенность ТС объекта уменьшается. Ценность получаемой информации тем выше, чем меньше сведений о ТС объекта имелось до проведения проверки.

В теории информации мерой неопределенности ТС объектов служит энтропия $H(X)$:

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

где P_i - вероятность i -го состояния объекта;

N - число различаемых состояний объекта, причем

$$\sum_{i=1}^N P_i = 1.$$

Основание логарифма 2 выбрано, исходя из дуальтернативной формы представления результатов элементарных проверок (больше-меньше, да-нет, годен-негоден и т.д.), а также с учетом особенностей работы современных ЭВМ. При написании формул основание логарифма обычно опускается.

Единицей энтропии служит бит - энтропия простейшего объекта, имеющего два равновероятных состояния

$$H(X) = H(2) = - (0,5 \cdot \log 0,5 + 0,5 \cdot \log 0,5) = - \log 0,5 = 1 \text{ бит.}$$

Энтропия объекта, имеющего N - равновероятных состояний, вычисляется по формуле:

$$H(X) = H(N) = \log N.$$

Энтропия объекта, состоящего из двух независимых систем X и Y , равна сумме их энтропий:

$$H(X^{\wedge}Y) = H(X) + H(Y).$$

Если системы X и Y зависимые, т.е. состояния системы Y зависят от того, в каком состоянии находится система X , то условная энтропия объекта $H(X^{\wedge}Y)$ составит:

$$H(X^{\wedge}Y) = H(X) + H(Y/X) = H(Y) + H(X/Y),$$

где $H(Y/X)$ - остаточная энтропия системы Y после того, как состояние системы X определилось.

Если все состояния системы Y предопределяются состояниями системы X , то энтропия объекта будет равна энтропии системы X , т.е.

$$H(X^{\wedge}Y) = H(X) = H(Y).$$

Количество информации $I(X)$, получаемой при проведении проверки, определяется по уменьшению энтропии объекта:

$$I(X) = H(X) - H'(X),$$

где $H'(X)$ - энтропия объекта, остающаяся после проверки.

Таким образом, для определения ТС объекта необходимо, чтобы выполнялось условие $I(X) = H(X)$, т.е. чтобы энтропия объекта после проверки была равна нулю.

Так, например, для определения ТС объекта, имеющего $N = 16$ равновероятных состояний, необходимо $I(K) = H(N) = \log N = \log 16 = 4$, т.е. 4 элементарные проверки (рис. 4).

При проверке ТС сложных объектов (систем ЛА) обычно наблюдаются не состояния проверяемой системы (X), а их отображение в системе контроля (Y). В силу вероятностного характера возникновения состояний систем количество инфор-

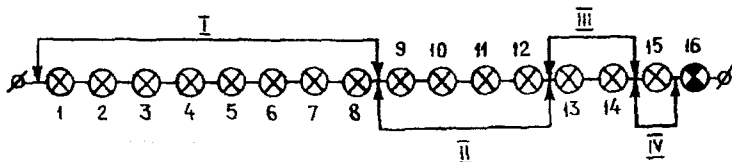


Рис. 4. Схема поиска отказавшего элемента

мации о системе X , получаемой при наблюдении системы Y , вычисляется по формуле:

$$I(X^{\wedge}Y) = H(X^{\wedge}Y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K P_{ij} \cdot \log(P_{ij}/P_i \cdot R_j),$$

где N, K - число различаемых состояний систем X и Y ;
 P_i, R_j - вероятности состояний систем X и Y ;
 P_{ij} - вероятность совместного наступления состояний X_i и Y_j .

Количество информации о системе X , которое можно получить, наблюдая отдельное Y_j состояние системы Y , вычисляется по формуле:

$$I(X^{\wedge}Y_j) = H(X^{\wedge}Y_j) = \sum_{i=1}^N (P_{ij}/R_j) \cdot \log(P_{ij}/P_i \cdot R_j).$$

Количество информации о состоянии X_i , которое можно получить, наблюдая состояние Y_j , вычисляется по формуле:

$$I(X_i^{\wedge}Y_j) = H(X_i^{\wedge}Y_j) = \log(P_{ij}/P_i \cdot R_j).$$

Приведенные формулы используются при определении информативности систем ТД, выборе диагностических признаков (ДП), а также при составлении алгоритмов поиска де-

фектов. Исходные данные для проведения расчетов получают путем математической обработки статистических данных эксплуатации и испытаний объектов.

6. НАДЕЖНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ТД

Надежность результатов ТД характеризуется вероятностью события, состоящего в том, что результат проверки соответствует фактическому ТС объекта, которое было известно до проведения проверки. Результаты элементарных проверок обычно представляются в двувальтернативной форме (годен-негоден, больше-меньше и т.д.) с учетом положения текущих значений ДП относительно границ соответствующих допусков.

В силу конечной точности измерений значений ДП, определяемой величинами систематических и случайных погрешностей, возникают ошибки при определении ТС объекта. Вероятность ошибок тем выше, чем меньше поле допуска и ближе истинное значение ДП к его предельно допустимому (граничному) значению.

Наиболее сильное влияние на надежность результатов ТД (в силу сложности учета) оказывают случайные погрешности, которые возникают вследствие нестабильности значений измеряемых параметров, неточности считывания показаний измерительных приборов и т.д. Для повышения надежности ТД при наличии случайных погрешностей обычно прибегают к многократному повторению измерений ДП с последующей математической обработкой полученных результатов. В качестве текущего значения параметра η_i при большом числе наблюдений обычно используется среднее значение результатов измерений η_i :

$$\eta_i = \bar{\eta}_i = \left(\sum_{i=1}^n \eta_i \right) / n,$$

где η_i - результат i -го измерения ДП;
 n - число наблюдений.

В случае разовых измерений ДП учитывается величина рассеяния результатов измерений, которую определяют путем проведения специальных исследований. Как правило, рассеяние результатов измерений при наличии случайных погрешностей подчиняется нормальному закону и характеризуется величиной среднеквадратического отклонения σ_η :

$$\sigma_\eta = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta_t)^2 / (n - 1)\right)}.$$

При этом для каждого ДП и измерительного прибора величина σ_η обычно остается постоянной в широком диапазоне значений параметра. Результат проверки при разовом измерении ДП можно считать надежным, если измеренное значение параметра η_i отстоит от границы допуска на величину более $3\sigma_\eta$. В противном случае вероятность ошибочного диагноза может оказаться больше допустимой.

При оценке надежности результатов ТД обычно используется доверительный интервал значений ДП $[\eta]_\gamma$, в который истинное значение параметра попадает с заданной вероятностью γ :

$$[\eta]_\gamma = \eta_t \pm U_\gamma \cdot \sigma_\eta,$$

где U_γ - квантиль нормального распределения, соответствующий заданной вероятности γ .

Результат проверки считается надежным, если граница допуска $[\eta]$ не накрывается доверительным интервалом. В противном случае надежность результатов проверки оценивается по величине вероятностей ошибок первого и второго рода. Величина ошибки первого рода α определяет вероятность события, состоящего в том, что "годный" объект по результату проверки будет признан "негодным", а величина ошибки второго рода β - вероятность события, состоящего в том, что "негодный" объект по результату проверки будет признан "годным".

Вероятности ошибок α и β определяются, исходя из следующих соображений (рис. 5):

если объект находится в состоянии "годен" ($\eta_t > [\eta]$), то вероятность ошибки первого рода составит (рис. 5а):

$$\alpha = \Phi^* \{ ([\eta] - \eta_t) / \sigma_\eta \},$$

где $\Phi^* \{ \}$ - табличный интеграл вероятностей;

если объект находится в состоянии "негоден" ($\eta_t < [\eta]$), то вероятность ошибки второго рода составит (рис. 5б):

$$\beta = 1 - \Phi^* \{ ([\eta] - \eta_t) / \sigma_\eta \}.$$

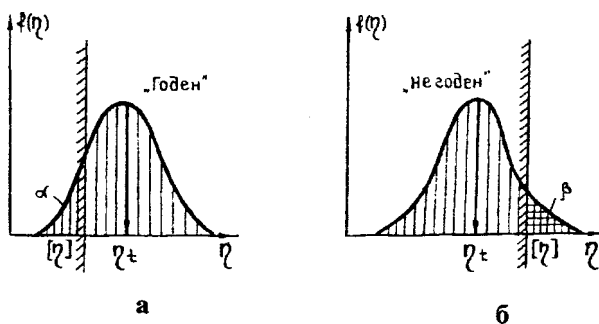


Рис. 5. Схема оценки надежности результатов ТД:
а - для "годного" объекта; б - для "негодного" объекта

В тех случаях, когда величины ошибок превышают допустимые значения, проводятся мероприятия по совершенствованию системы ТД.

В случае качественных оценок ДП ("есть-нет", "больше-меньше" и т.д.) величины ошибок оцениваются статистическим методом. Для этого подбирается коллекция (более 20

штук) однотипных объектов, содержащая известное число "годных" и "негодных" экземпляров. Затем путем многократного повторения проверок объектов ($n > 100$) заданными методами и средствами в условиях, максимально приближенных к реальным, подготавливаются исходные данные для проведения расчетов. Значения α и β вычисляются по формулам:

$$\alpha = m / N; \quad \beta = n / M,$$

где m - число результатов "негоден", полученных при проверке N "годных" объектов;
 n - число результатов "годен", полученных при проверке M "негодных" объектов.

Основным недостатком статистического метода является то, что при его использовании достаточно сложно выявить причины возникновения ошибок, а следовательно и провести мероприятия, направленные на совершенствование системы ТД.

7. ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ТД

Достоверность результатов ТД характеризуется вероятностью события, состоящего в том, что результат проверки (диагноз) соответствует фактическому ТС объекта, вероятность возникновения которого была известна до проведения проверки. Достоверность ТД (рис. 6) зависит от величины ошибок первого и второго рода, а также от вероятностей нахождения объекта в состояниях "годен" (P) и "негоден" ($1 - P$).

Вероятности правильных результатов "годен" (P_r) и "негоден" ($P_{\bar{r}}$) с учетом надежности результатов ТД составят:

$$P_r = P(1 - \alpha); \quad P_{\bar{r}} = (1 - P)(1 - \beta).$$

Вероятности ошибочных результатов "годен" (P_r) и "негоден" ($\bar{P}_{\bar{r}}$) составят:

$$\bar{P}_r = P \cdot \alpha; \quad \bar{P}_{\bar{r}} = (1 - P) \cdot \beta.$$

Полные вероятности результатов "годен" (P_r^*) и "негоден" ($P_{\bar{r}}^*$) составят:

$$P_r^* = \bar{P}_r + P_{\bar{r}} = P(1 - \alpha) + (1 - P) \cdot \beta;$$

$$P_{\bar{r}}^* = P_{\bar{r}} + \bar{P}_r = (1 - P) \cdot (1 - \beta) + P \cdot \alpha.$$

Достоверности диагнозов "годен" (D_r) и "негоден" ($D_{\bar{r}}$) вычисляются с использованием формулы Байеса:

$$D_r = P_r / P_r^* = P(1 - \alpha) / [P(1 - \alpha) + (1 - P) \cdot \beta];$$

$$D_{\bar{r}} = P_{\bar{r}} / P_{\bar{r}}^* = (1 - P) \cdot (1 - \beta) / [(1 - P) \cdot (1 - \beta) + P \cdot \alpha].$$

Использование двух показателей достоверности объясняется тем, что они по разному влияют на эффективность ТД и имеют различную природу возникновения ошибок.

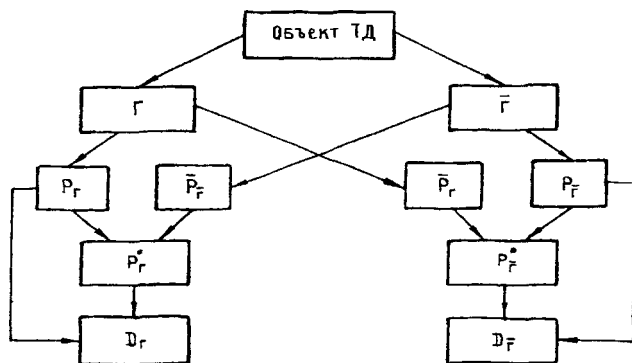


Рис. 6. Схема определения достоверности результатов ТД

Так, показатель D_r определяет вероятность правильного диагноза "годен" и влияет в основном на трудоемкость и оперативность диагностирования, что связывается с необходимостью проведения повторных проверок "годных" объектов. Показатель $D_{\bar{r}}$ определяет вероятность правильного диагноза

"негоден" и влияет, в основном, на уровень безотказности АТ, что связывается с пропуском в эксплуатацию "негодных" объектов.

Факторы, влияющие на достоверность результатов ТД, можно условно разделить на методические и точностные. Возникновение методических ошибок связывается с неправильным выбором ДП и их граничных значений, методов и средств контроля, а также с низким качеством алгоритмов ТД. Вероятности их возникновения характеризуют качество разработки системы ТД.

Точностные ошибки связываются в основном с качеством средств ТД, условиями проведения проверок, а также с квалификацией исполнителей. Вероятности их возникновения характеризуют эффективность применения системы ТД.

8. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ И ПАРАМЕТРЫ

При формировании систем ТД особое место уделяется выбору диагностических признаков и параметров (ДП), так как от качества решения этой задачи в значительной степени зависит эффективность их применения.

При выборе ДП исходят из того, что ТС объекта характеризуется некоторой совокупностью качественных и количественных параметров (дымление, тряска, температура, давление и т.д.), часть которых может быть использована в качестве ДП. Кроме того, предполагается, что объект обладает некоторой структурой, т.е. упорядоченной совокупностью взаимосвязанных элементов, обеспечивающих выполнение функций, предусмотренных его рабочим алгоритмом. При этом структура объекта условно разделяется на макро- и микроструктуру.

Макроструктура определяет характер взаимодействия между структурными элементами объекта и характеризуется номенклатурой и величиной выходных (вторичных) параметров (тяга, производительность, температура, давление и т.д.).

Микроструктура определяет ТС структурных элементов объекта и характеризуется номенклатурой и величиной рабо-

чих (первичных) параметров (КПД узлов ГТД, геометрические размеры деталей, величина зазоров и т.д.).

При наличии формального описания рабочего процесса объекта (математической модели), определяющего взаимосвязь между величинами первичных и вторичных параметров, по измеренным значениям первичных параметров можно косвенно судить о значениях вторичных, т.е. решать прямые задачи ТД. С другой стороны, при наличии зависимостей между величинами вторичных и первичных параметров (диагностической модели объекта) по измеренным значениям вторичных параметров можно косвенно судить о значениях первичных, т.е. решать обратные задачи ТД.

Так, например, по данным измерения зазоров качающего узла насоса можно судить о его производительности (прямая задача), а по результатам измерения производительности насоса - о степени износа деталей качающего узла (обратная задача).

В практике эксплуатационной диагностики АТ преобладают обратные задачи, так как вторичные параметры изделий могут быть измерены с использованием бортовой системы контроля ЛА. При решении прямых задач приходится прибегать к использованию средств локального диагностирования (мерительный инструмент, средства дефектоскопии и т.д.), что часто связывается с необходимостью частичной или полной разборки конструкций.

Для того чтобы вторичный параметр мог быть использован в качестве ДП, он должен отвечать ряду специфических требований. К их числу относятся: однозначность, широта, информативность и доступность.

Однозначность параметра означает наличие определенной зависимости между его значениями и значениями первичных параметров, характеризующих ТС объекта. Так, производительность насоса Q при постоянном давлении однозначно (рис. 7) связана с величиной износа h качающего узла.

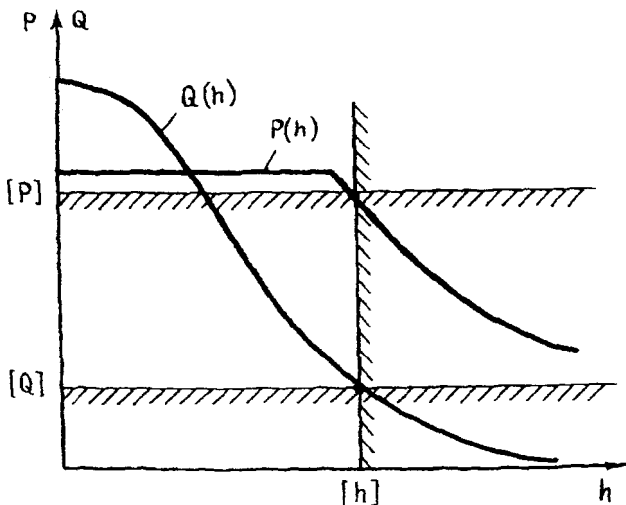


Рис. 7. Зависимость производительности Q и давления P за насосом от величины износа h качающего узла

В то же время давление за насосом P до определенной степени износа качающего узла зависит только от настройки редуционного клапана.

Широта параметра означает возможность его использования для определения ТС объекта в заданном диапазоне изменения значений первичных параметров. Так, производительность насоса Q позволяет определить величину износа качающего узла практически на всем диапазоне изменения зазоров, а давление P - только в узком диапазоне значений зазоров.

Информативность параметра характеризуется количеством информации о ТС объекта, которую можно получить при

наблюдении всех его реализаций. При этом различают диагностический вес, диагностическую ценность и общую информативность параметра.

Диагностический вес параметра $Z/D_i(K_j)$ характеризуется количеством информации, которую можно получить об отдельном D_i состоянии объекта, наблюдая его отдельную K_j реализацию. Например, количество информации об обрыве лопатки турбины, наблюдая повышение температуры выходящих газов. Согласно теории информации диагностический вес параметра вычисляется по формуле:

$$Z/D_i(K_j) = I(X_i \wedge Y_j) = \log P_{ij} / P_i \cdot R_j,$$

где P_{ij} - вероятность совместного появления D_i состояния объекта и K_j реализации параметра;

P_i - вероятность D_i состояния объекта;

R_j - вероятность K_j реализации параметра.

Диагностическая ценность параметра характеризуется количеством информации $Z/D(K_j)$, которую можно получить о всех различаемых ТС объекта, наблюдая его отдельную реализацию K_j . Например, — количество информации о состоянии ГТД, наблюдая повышение температуры выходящих газов. Согласно теории информации диагностическая ценность параметра вычисляется по формуле:

$$Z/D(K_j) = I(X \wedge Y_j) = \sum_{i=1}^N (P_{ij} / R_j) \cdot \log P_{ij} / P_i \cdot R_j,$$

где N - число различаемых ТС объекта, причем $\sum_{i=1}^N P_i = 1$.

Общая информативность параметра характеризуется количеством информации $Z/D(K)$, которую можно получить о всех различаемых ТС объекта, наблюдая все его различаемые реализации. Например, количество информации о состоянии ГТД, наблюдая за температурой выходящих газов. Согласно

теории информации общая информативность параметра вычисляется по формуле:

$$Z/D(K) = I(X^N Y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K P_{ij} \cdot \log(P_{ij} / P_i \cdot R_j),$$

где K - число различаемых реализаций параметра, причем

$$\sum_{j=1}^K R_j = 1.$$

Доступность параметра означает возможность его использования для целей ТД без проведения трудоемких дополнительных операций (демонтажа объекта из конструкции, постановки дополнительных датчиков и т.д.). Так, производительность насоса обычно измеряется с использованием специальной аппаратуры (стендов), что требует его демонтажа из конструкции или постановки на объект дополнительных измерительных приборов. В то же время давление за насосом измеряется непосредственно с помощью бортовой системы контроля ЛА.

В зависимости от задачи и условий проведения работ (проверка работоспособности, поиск дефектов, в условиях стоянки, в полете и т.д.) предпочтение отдается показателям, обеспечивающим наиболее высокую эффективность системы ТД. Так, при проверке работоспособности объектов предпочтение обычно отдается параметрам, обладающим высокой однозначностью, широтой и диагностической ценностью, а при поиске дефектов - высокой доступностью и диагностическим весом.

9. КОМПЛЕКСНЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ

Параметры объектов, которые используются в качестве ДП при проверках работоспособности (температура газов, давление, тяга и т.д.), обычно обладают высокой диагностиче-

ской ценностью и общей информативностью, но относительно малым диагностическим весом. В силу этого они не обеспечивают достаточной глубины ТД, т.е. не позволяют осуществлять распознавание элементарных неисправностей (дефектов).

С целью повышения глубины ТД обычно прибегают к использованию комплексных ДП (K^*), в состав которых входят несколько простых признаков (K_j), т.е. $K^*(K_1, K_2, \dots, K_j, \dots, K_m)$. При этом каждый простой ДП с некоторой вероятностью $P(K_j/D_i)$ характеризует D_i состояние объекта. В большинстве случаев реализуется условие независимости ДП, тогда

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

Взаимосвязь между отдельными ТС и появлением ДП обычно устанавливается на основе данных специальных исследований, серийной эксплуатации или анализа математических моделей объектов.

Вероятности $P(D_i)$ при этом вычисляются по формуле:

$$P(D_i) = N_i / N,$$

где N_i - число объектов из общего числа N , у которых наблюдалось состояние D_i , вероятности $P(K_j)$ - по формуле $P(K_j) = N_j / N$,

где N_j - число объектов из общего числа N , у которых обнаружен признак K_j , а вероятности $P(K_j/D_i)$ - по формуле $P(K_j/D_i) = N_{ij} / N_i$,

где N_{ij} - число объектов из числа N_i , у которых наблюдался признак K_j .

В силу того, что ДП обычно представляются в дуальтернативной форме ("есть - нет") вероятности $P(\bar{K}_j/D_i)$ при отсутствии реализации признака вычисляются по формуле:

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

Взаимосвязь между ТС и ДП обычно носит вероятностный характер (признак может проявиться или не проявиться

при возникновении неисправности). В силу этого при выборе комплексных ДП обычно прибегают к использованию формулы Байеса:

$$P(D_i/K^*) = \frac{P(D_i) \cdot P(K^*/D_i)}{\sum_{r=1}^N P(D_r) \cdot P(K^*/D_r)},$$

где $P(D_i/K^*)$ - вероятность состояния (диагноза) D_i при реализации комплекса K^* ;

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

Выбор комплекса K^* при этом проводится по максимуму вероятности $P(D_i/K^*)$. Комплексный ДП считается выбранным, если выполняется условие

$P(D_i/K^*) > P_{\text{зад}}$, где $P_{\text{зад}}$ - заданная вероятность распознавания D_i состояния объекта.

10. РАСПОЗНАВАНИЕ ТС ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

Большая часть изделий АТ (двигатели, функциональные системы, агрегаты и т.д.) относится к сложным техническим устройствам, для которых практически невозможно указать все ТС и их ДП. В силу этого при составлении диагностических моделей таких объектов обычно ограничиваются перечнем наиболее вероятных (типовых) неисправностей (дефектов) и ДП, характеризующих их появление. Ограниченные возможности систем ТД, когда наблюдается только некоторая часть ДП, а также отсутствие однозначной взаимосвязи между ТС и ДП приводит к тому, что результаты ТД (диагнозы) носят вероятностный характер. В силу этого при постановке диагнозов обычно прибегают к использованию статистических методов распознавания ТС объектов и, в частности, метода Байеса.

Постановка задачи в этом случае такова. Имеется некоторый объект ТД, который может находиться в одном из N - случайных состояний D_i . Известен комплекс простых ДП – $K^*(K_1, K_2, \dots, K_j, \dots, K_m)$, каждый из которых с вероятностью $P(K_j/D_i)$ характеризует D_i состояние объекта. Требуется по совокупности появления K_j или неоявления K_j отдельных признаков отнести ТС объекта к одному из возможных диагнозов.

Вероятность $P(D_i / K^*)$ диагноза D_i при реализации комплекса K^* вычисляется по формуле Байеса:

$$P(D_i / K^*) = \frac{P(D_i) \cdot P(K^* / D_i)}{\sum_{r=1}^N P(D_r) \cdot P(K^* / D_r)},$$

где $P(K^* / D_i)$ - вероятность появления комплекса K^* при возникновении состояния D_i ; N - число различаемых состояний объекта; $P(D_r)$ - вероятность возникновения состояния D_r ,

причем $\sum_{r=1}^N P(D_r) = 1$.

При постановке окончательного диагноза придерживаются правила: объект при наблюдении комплекса K^* относится к диагнозу D_i по наибольшей вероятности $P(D_i / K^*)$, т.е. K^* принадлежит D_i при $P(D_i / K^*) = \max$.

В условиях эксплуатации ЛА основным источником информации для проведения расчетов служат карточки учета отказов и неисправностей АТ, акты исследования досрочно снятых изделий, а также результаты контроля АТ при ТО и Р.

При этом вероятности $P(D_i)$ и $P(K^* / D_i)$ рассчитываются по формулам: $P(D_i) = \frac{n_i}{N}$; $P(K^* / D_i) = \frac{n_i^*}{n_i}$, где n_i - число изделий из общего числа N , у которых наблюдалось состояние D_i ; n_i^* - число изделий из числа n_i , у которых наблюдался комплекс K^* .

11. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

При проверках работоспособности сложных многофункциональных объектов (двигателей, функциональных систем и т.д.) в качестве ДП обычно используются измеряемые в полете параметры (температура газов, расход топлива, давление, уровень вибрации и т.д.), которые обладают относительно низкой чувствительностью к изменению ТС изделий. В результате наблюдается запаздывание получения диагностической информации о моментах появления неисправностей, что в конечном итоге может привести к возникновению отказов.

С целью повышения оперативности распознавания быстро развивающихся неисправностей обычно прибегают к использованию интегральных ДП. В качестве интегрального ДП может использоваться КПД изделий, который учитывает все возможные потери энергии, связанные с изменением их ТС. Так, например, для ТВД предложен интегральный ДП, который вычисляется по формуле:

$$K_{\eta} = N_{\text{в}} / G_{\text{т}} \cdot H_{\text{ц}},$$

где K_{η} - интегральный ДП, характеризующий работоспособность двигателя по изменению КПД;

$N_{\text{в}}$ - приведенная мощность на винте;

$G_{\text{т}}$ - приведенный расход топлива;

$H_{\text{ц}}$ - теплотворная способность топлива.

В качестве интегральных ДП могут использоваться также эмпирически подобранные показатели, являющиеся совокупностью нескольких разнородных параметров изделий. Основными условиями выбора параметров при этом являются:

- возможность измерения и регистрации в полете;
- наличие логической связи между величинами параметров и ТС;
- наличие сведений о тенденциях изменения параметров при изменении ТС;
- возможность приведения параметров к САУ и заданному режиму работы.

Проверка работоспособности объектов при использовании интегральных ДП проводится путем сопоставления текущих значений ДП K_η с их предельно допустимыми значениями $[K_\eta]$ или с использованием относительного показателя \bar{K}_η :

$$\bar{K} = K_\eta / [K_\eta] \text{ или } \bar{K} = (K_\eta - [K_\eta]) / [K_\eta].$$

В некоторых случаях проверки работоспособности объектов проводятся по скорости изменения величины ДП. При этом вычисляются значения показателя K_τ :

$$K_\tau = (K_\eta - [K_\eta]) / \tau,$$

где τ - наработка объекта между проверками.

Выполнение условий $K_\eta \leq [K_\eta]$, $\bar{K} \leq [\bar{K}]$ и $K_\tau \leq [K_\tau]$ свидетельствует об отсутствии недопустимых отклонений в ТС объекта.

Так, например, для раннего распознавания отказа межвального подшипника двигателя НК-86 предложен интегральный параметр \bar{K}_η который вычисляется по формуле:

$$\bar{K}_\eta = \sqrt{K_{\text{по}}^2 + K_{\text{зо}}^2 + K_{\text{вх}}^2 + K_{\text{вых}}^2} < [K_\eta] = 4.8,$$

где $K_{\text{по}} = V_{\text{по}} / V_{\text{по}}^*$; $K_{\text{зо}} = V_{\text{зо}} / V_{\text{зо}}^*$; $K_{\text{вх}} = T_{\text{вх}} / T_{\text{вх}}^*$;
 $K_{\text{вых}} = T_{\text{вых}} / T_{\text{вых}}^*$ - соответственно относительные показатели уровня вибрации по передней и задней опоре, температуры масла на входе и выходе из двигателя;
 $V_{\text{по}}, V_{\text{по}}^*, V_{\text{зо}}, V_{\text{зо}}^*, T_{\text{вх}}, T_{\text{вх}}^*, T_{\text{вых}}, T_{\text{вых}}^*$ - соответственно измеренные и базовые (исходные) значения параметров.

Эффективность применения показателя \bar{K}_n наглядно иллюстрируется графиками (рис. 8), построенными на основе данных полетной информации.

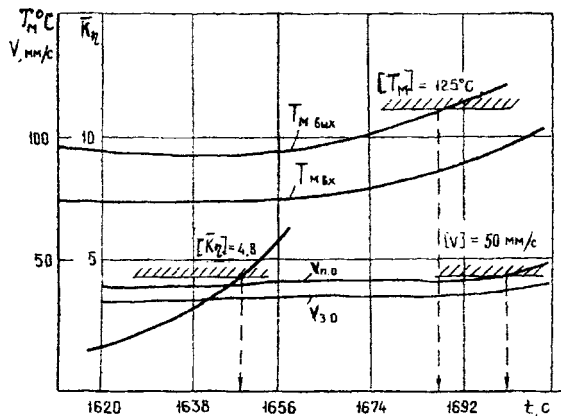


Рис. 8. Изменение параметров двигателя НК-86 при развитии отказа межвального подшипника

Из приведенных графиков видно, что время распознавания неисправности подшипника при использовании интегрального ДП сокращается по сравнению с параметром "температура масла" на 40 с, по сравнению с параметром "вибрация" - более, чем на 60 с. Это дает возможность экипажу принять своевременные меры по предупреждению разрушения подшипника (произвести останов двигателя).

12. СТРУКТУРА ТД ПРИ ПРОВЕРКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБЪЕКТОВ

Структура ТД характеризуется номенклатурой выделяемых состояний и вероятностями попадания в них объектов ди-

агностирования. Она зависит от поставленной задачи, вероятности нахождения объектов в различных ТС и достоверности результатов ТД. Структуру ТД при проверке работоспособности объекта можно представить в следующем виде (рис. 9).

Объект диагностирования, отработав очередной цикл эксплуатации "0" длительностью τ , попадает в состояние ожидания проверки "1". При этом он может находиться в работоспособном состоянии "2" с вероятностью P или в неработоспособном состоянии "3" с вероятностью $(1-P)$.

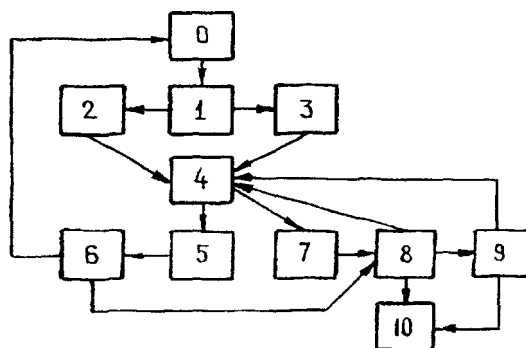


Рис. 9. Структура ТД при проверке работоспособности объекта

Объект из состояния "2", пройдя проверку ("4"), попадает в состояние "5" ("годен"). Вероятность правильного диагноза "годен" при этом составит $P_r = P \cdot (1 - \alpha)$. Из состояния "5" объект попадает на прогнозирование остаточного ресурса "6". При положительном прогнозе ресурса ($t_p > \tau$) объект попадает в очередной цикл эксплуатации "0". При отрицательном прогнозе ($t_p < \tau$) объект попадает в состояние поиска возможной неисправности "8". После выявления причины возможной неисправности объект переходит в состояние ее устранения "9", откуда возвращается в состояние "4" и далее идет по прежней

схеме ("4-5-6-0"). В случае неустранения причины возможной неисправности объект снимается с эксплуатации ("10").

Объект из состояния "3", пройдя проверку ("4"), попадает в состояние "7" ("негоден"). Вероятность правильного диагноза "негоден" при этом составит $P_{\bar{F}} = (1 - P) \cdot (1 - \beta)$. Из состояния "7" объект попадает в состояние "8", а затем в состояние "9". После устранения неисправности объект возвращается в состояние "4" и далее идет по схеме "4-5-6-0" или "4-5-6-8-9-4-5-6-0", или "4-5-6-8-10".

В силу наличия ошибочных диагнозов "годен" объект из состояния "3", пройдя проверку ("4") с вероятностью $(1 - P) \cdot \beta$, попадает в состояние "5", а затем в состояние "6". При положительном прогнозе ресурса, что возможно в силу повторного использования искаженной информации о ТС, неисправный объект попадает в состояние "0".

В силу наличия ошибочных диагнозов "негоден" объект из состояния "2", пройдя проверку с вероятностью $P \cdot \alpha$, попадает в состояние "7", а затем в состояние "8" на поиск несуществующей неисправности. В силу того, что неисправность фактически отсутствует, результат поиска будет отрицательным и объект возвратится в состояние "4" и далее идет по схеме "4-5-6-0" или "4-5-6-8-9-4-5-6-0", или "4-5-6-8-10".

Таким образом, наличие ошибочных диагнозов "негоден" приводит к повышению трудоемкости, времени и стоимости работ, что связано с необходимостью поиска несуществующих неисправностей, а наличие ошибочных диагнозов "годен" - к возникновению отказов, так как в эксплуатацию попадают неисправные объекты.

13. ГРАНИЧНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Проверки работоспособности объектов обычно проводятся путем сопоставления текущих значений ДП с их предельно допустимыми (граничными) значениями, правила определения которых выбираются, исходя из некоторых условий оптимальности, например, из условия минимального риска.

Методику определения граничных значений ДП рассмотрим для случая, когда ТС объекта распознается по одному параметру η . Задача состоит в выборе значения параметра $[\eta]$, при котором в случае $\eta > [\eta]$ принимается решение о снятии объекта с эксплуатации ("негоден"), а в случае $\eta < [\eta]$ - о его дальнейшем использовании по назначению ("годен"). Таким образом, по значению $[\eta]$ состояния объекты разделяются на два класса (диагноза): D_1 - исправные ("годные") и D_2 - неисправные ("негодные"). Указанное правило решения задачи начинается:

$$\begin{aligned} \text{при } \eta < [\eta] \text{ П принадлежит } D_1; \\ \text{при } \eta > [\eta] \text{ П принадлежит } D_2. \end{aligned} \quad (1)$$

Плотности вероятностей распределения параметра η у исправных $f(\eta / D_1)$ и неисправных $f(\eta / D_2)$ объектов представлены на рис. 10.

Из рисунка видно, что области исправных (D_1) и неисправных (D_2) состояний пересекаются. В силу этого невозможно указать значение $[\eta]$, при котором правило (1) не давало бы ошибочных решений (диагнозов). Задача состоит в том, чтобы выбор $[\eta]$ был в некотором смысле оптимальным.

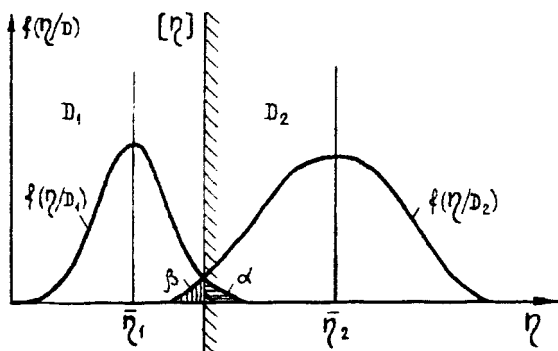


Рис. 10. Схема определения ВТС объектов

Возможными ошибками при постановке диагнозов являются:

- ложная тревога, когда исправный ("годный") объект признается неисправным ("негодным");
- пропуск дефекта, когда неисправный ("негодный") объект признается исправным ("годным").

Вероятности ложной тревоги $P_{лт}$ и пропуска дефектов $P_{пл}$ вычисляются по формулам:

$$P_{лт} = P(D_1) \cdot P(\eta > [\eta] / D_1) = P_1 \cdot \int_{[\eta]}^{+\infty} f(\eta / D_1) \cdot d\eta = P_1 \cdot \alpha;$$

$$P_{пл} = P(D_2) \cdot P(\eta < [\eta] / D_2) = P_2 \cdot \int_{-\infty}^{[\eta]} f(\eta / D_2) \cdot d\eta = P_2 \cdot \beta, \quad (2)$$

где α, β - соответственно вероятности ошибок первого и второго рода;

P_1, P_2 - соответственно вероятности состояний D_1 и D_2 (вычисляются по данным эксплуатации объекта), причем $P_1 + P_2 = 1$.

Таким образом, вероятность ошибочных диагнозов $P_{ош}$ при граничном значении $[\eta]$ составит:

$$P_{ош} = P_{лт} + P_{пл}. \quad (3)$$

Если в выражении (3) указать цены ошибок ($C_{лт}$ - стоимость ложной тревоги, $C_{пл}$ - стоимость пропуска дефекта), то получим выражение, которое используется для расчета риска проверки R :

$$R = C_{лт} \cdot P_{лт} + C_{пл} \cdot P_{пл}. \quad (4)$$

Дифференцируя (4) с учетом (2) по $[\eta]$ и приравняв производную $dR / d[\eta]$ к нулю, получим выражение, которое используется для определения граничного значения параметра $[\eta]$, отвечающего условию минимального риска R_{\min} :

$$dR / d[\eta] = C_{\text{пт}} \cdot P_1 \cdot f([\eta]/D_1) - C_{\text{пл}} \cdot P_2 \cdot f([\eta]/D_2) = 0,$$

$$\text{откуда } f([\eta]/D_1) / f([\eta]/D_2) = C_{\text{пл}} \cdot P_2 / C_{\text{пт}} \cdot P_1. \quad (5)$$

Параметр η , как правило, распределен по нормальному закону с плотностями $f([\eta]/D_1)$ и $f([\eta]/D_2)$. Подставив выражения для расчета плотностей в (5) и проведя математические преобразования, получим выражение для расчета $[\eta]$ по методу минимального риска:

$$-\frac{([\eta] - \bar{\eta}_1)^2}{2\sigma_1^2} + \frac{([\eta] - \bar{\eta}_2)^2}{2\sigma_2^2} = \ln \left\{ \frac{\sigma_1 \cdot C_{\text{пл}} \cdot P_2}{\sigma_2 \cdot C_{\text{пт}} \cdot P_1} \right\}, \quad (6)$$

где $\bar{\eta}_1, \bar{\eta}_2, \sigma_1, \sigma_2$ - соответственно среднее значение параметра η у "исправных" и "неисправных" объектов и их СКО.

Из (2), используя табличные значения интеграла вероятностей, получим выражения для расчета $P_{\text{пт}}$ и $P_{\text{пл}}$:

$$P_{\text{пт}} = P_1 \cdot (1 - \Phi^* \left\{ \frac{[\eta] - \bar{\eta}_1}{\sigma_1} \right\}); \quad (7)$$

$$P_{\text{пл}} = P_2 \cdot \Phi^* \left\{ \frac{[\eta] - \bar{\eta}_2}{\sigma_2} \right\}. \quad (8)$$

Из (4), с учетом (7) и (8), получим выражение для расчета R_{min} :

$$R_{\text{min}} = C_{\text{пт}} \cdot P_1 \cdot (1 - \Phi^* \left\{ \frac{[\eta] - \bar{\eta}_1}{\sigma_1} \right\}) + C_{\text{пл}} \cdot P_2 \cdot \Phi^* \left\{ \frac{[\eta] - \bar{\eta}_2}{\sigma_2} \right\}.$$

Наряду с методом минимального риска при определении граничных значений параметров могут использоваться и другие методы статистических решений, например, метод наи-

большого правдоподобия, Неймана - Пирсона и др. Однако на практике предпочтение обычно отдается методу минимального риска, который при наличии исходных данных обеспечивает наиболее достоверные результаты ТД.

14. ОСОБЕННОСТИ ТД МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Характерной особенностью большей части изделий АТ (ГТД, функциональных систем ЛА и их агрегатов) является то, что они представляют собой сложные многофункциональные системы, состоящие из большого числа взаимосвязанных элементов. В процессе эксплуатации они могут иметь множество ТС, которые в силу взаимного влияния контролируемых параметров достаточно сложно классифицировать. Так, например, износ рабочих лопаток турбин ГТД, характеризуемый изменением КПД турбины, напрямую контролировать практически невозможно. Однако имеется возможность оценить изменение ТС турбины по величине отклонений выходных (измеряемых) параметров двигателя (температуры выходящих газов, оборотов роторов, расхода топлива и т.д.) от их базовых (исходных) значений.

Для решения таких задач необходимо установить взаимосвязь между величинами отклонений параметров состояния (ПС) и величинами отклонений измеряемых параметров (ИП) объекта. Таким образом, составлению алгоритма ТД объекта должен предшествовать комплекс исследований, связанных с разработкой формального описания (математической модели) его рабочих процессов как в исправном, так и во всех типовых неисправных состояниях. Использование таких моделей позволяет по величине отклонений ПС от их базовых (исходных) значений оценить величину отклонений ИП.

При составлении моделей объект ТД рассматривается как динамическая система, состояние которой в каждый момент времени t характеризуется значениями входных X , рабочих Y и

выходных Z параметров. В этом случае запись $Z = f(X, Y_{нач}, t)$ представляет собой модель исправного, а запись $Z' = f(X, Y_j, t)$ - модель объекта, находящегося в j -ом неисправном состоянии. Система уравнений, содержащая описание исправного и всех неисправных состояний представляет собой явную математическую модель объекта. Если в явном виде дано описание только исправного состояния объекта, а неисправные представлены в виде правил их описания, то имеет место неявная модель.

Математические модели обычно представляются в аналитической, матричной или графической форме. В практике ТД наиболее широкое распространение получили модели, представленные системой линейных уравнений в малых отклонениях параметров. При их составлении исходят из того, что на малом интервале изменения параметров нелинейные функции можно заменить линейными зависимостями без внесения существенных погрешностей в результаты расчетов. В этом случае отклонения ИП ($\delta\eta_i$) представляются в виде алгебраической суммы отклонений ПС ($\delta\vartheta_j$) с введением соответствующих коэффициентов взаимного влияния параметров (A_{ji}):

$$\delta\eta_i = \sum_{j=1}^N A_{ji} \cdot \delta\vartheta_j, \quad (1)$$

где $\delta\vartheta_j = (\vartheta_j - \vartheta_{j\text{баз}}) / \vartheta_{j\text{баз}}$;

$\vartheta_j, \vartheta_{j\text{баз}}$ - измеренное и базовое значения j -го ПС;

N - число измеряемых ПС.

При определении значений A_{ji} используются известные аналитические выражения, служащие для описания рабочих процессов объекта, или прибегают к проведению физических экспериментов с целью установления влияния ПС на ИП. После подстановки значений переменных (входных, рабочих и выходных параметров на заданном режиме работы объекта) в полученные аналитические выражения, логарифмирования и

дифференцирования они решаются относительно $\delta\eta_i$. Полученная таким образом модель объекта обычно представляется в виде матрицы коэффициентов взаимного влияния A_{ji} :

$\delta\eta_i$	$\delta\mathcal{G}_j$			
	$\delta\mathcal{G}_1$	$\delta\mathcal{G}_2$		
$\delta\eta_1$	$-A_{11}$	A_{21}		
$\delta\eta_2$	A_{12}	$-A_{22}$		

Матрица используется для предварительного (качественного) распознавания неисправностей, а также при составлении диагностической модели объекта.

Распознавание неисправностей (структурных элементов, явившихся причиной недопустимых отклонений ИП) проводится путем анализа знаков отклонений ИП (метод знаков). Знак "+" при коэффициенте A_{ji} означает, что отклонения $\delta\mathcal{G}_j$ и $\delta\eta_i$ направлены в одну, а знак "-" - в противоположные стороны. При постановке диагноза учитывается, что каждой неисправности объекта обычно соответствует определенная комбинация знаков отклонений ИП. Так, например, если при обследовании объекта обнаружено увеличение $\delta\eta_1$ и уменьшение $\delta\eta_2$, то согласно приведенной матрице имеет место неисправность, характеризуемая уменьшением $\delta\mathcal{G}_1$.

Метод знаков, как правило, не обеспечивает постановку однозначного диагноза. В этих случаях обычно используются вычислительные методы распознавания неисправностей, базирующиеся на анализе знаков и величин отклонений ИП.

Для этого на основе матрицы коэффициентов взаимного влияния составляется система линейных уравнений, которая решается относительно ПС ($\delta\mathcal{G}_j$). Полученная таким образом диагностическая модель объекта представляется системой линейных уравнений вида:

$$\delta\mathcal{G}_j = \sum_{i=1}^M K_{ij} \cdot \delta\eta_i,$$

где $\delta\eta_i = (\eta_i - \eta_{i\text{баз}}) / \eta_{i\text{баз}}$;

$\eta_i, \eta_{i\text{баз}}$ - измеренное и базовое (исходное) значения i -го ИП;

K_{ij} - диагностические коэффициенты взаимного влияния параметров;

M - число ИП.

Диагностические модели объектов также представляются в форме матрицы диагностических коэффициентов K_{ij} .

$\delta\mathcal{G}_j$	$\delta\eta_i$		
	$\delta\eta_1$	$\delta\eta_2$	
$\delta\mathcal{G}_1$	$-K_{11}$	K_{21}	
$\delta\mathcal{G}_2$	K_{12}	$-K_{22}$	

При ТД неисправным признается структурный элемент объекта, которому соответствует максимальное отклонение ПС ($\delta\mathcal{G}_j$) или минимальное значение величины "невязки" H_j , вычисляемой по формуле:

$$H_j = \sum_{i=1}^M (\delta\eta_i - \delta\eta_i^*)^2,$$

где $\delta\eta_i$ - отклонение i -го ИП по результатам обследования объекта;

$\delta\eta_i^*$ - расчетное отклонение i -го ИП, полученное с использованием математической модели объекта при условии $\delta\mathcal{G}_j = 0$.

С учетом приведенной матрицы K_{ij} имеем:

$$\begin{cases} \delta P_1 = -K_{11} \cdot \delta\eta_1^* + K_{21} \cdot \delta\eta_2^* = 0 \\ \delta P_2 = K_{12} \cdot \delta\eta_1^* - K_{22} \cdot \delta\eta_2^* = 0, \end{cases}$$

откуда

$$\begin{cases} \delta\eta_1^* = K_{21} \cdot \delta\eta_2^* / K_{11} \\ \delta\eta_2^* = K_{11} \cdot \delta\eta_1^* / K_{21} \end{cases} \quad \begin{cases} \delta\eta_1^* = K_{22} \cdot \delta\eta_2^* / K_{12} \\ \delta\eta_2^* = K_{12} \cdot \delta\eta_1^* / K_{22} \end{cases}$$

Тогда

$$H_1 = (\delta\eta_1 - K_{21} \cdot \delta\eta_2^* / K_{11})^2 + (\delta\eta_2 - K_{11} \cdot \delta\eta_1^* / K_{21})^2;$$

$$H_2 = (\delta\eta_1 - K_{22} \cdot \delta\eta_2^* / K_{12})^2 + (\delta\eta_2 - K_{12} \cdot \delta\eta_1^* / K_{22})^2.$$

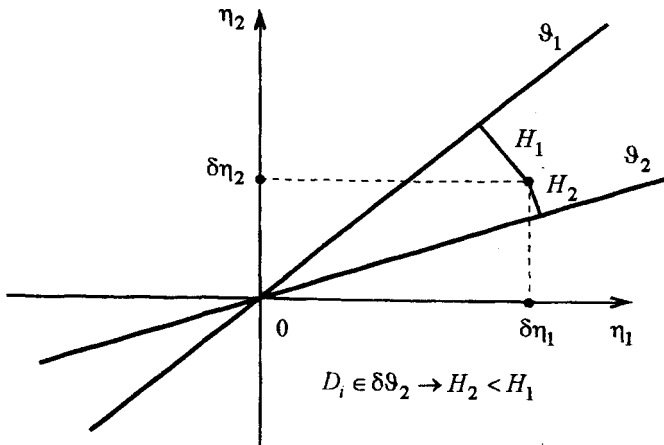


Рис. 11. Схема определения ТС объекта по величине «невязки» (H_j)

В случае "идеальной" модели и высокой точности измерений параметров у неисправного элемента значения $d\eta_i$ должны совпадать со значениями $\delta\eta_i^*$, т.е. $H_j = 0$. На практике обычно наблюдаются некоторые расхождения между измеренными и расчетными значениями ИП. Поэтому диагноз ставится по минимальной величине "невязки" $H_j = \min$ (рис.11).

15. АЛГОРИТМ ТД МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Содержание алгоритма ТД в общем случае определяется характером поставленной задачи, свойствами объекта, а также условиями проведения проверок. Так, в случае проверки работоспособности ГТД с поиском причин неисправностей (дефектов) при ручной регистрации параметров алгоритм ТД можно представить в виде, изображенном на рис. 12.

Согласно алгоритму ТД работы проводятся в следующей последовательности:

1. В процессе запуска и опробования двигатель выводится на режим работы, близкий к номинальному ($N_{зад}$); после стабилизации параметров (через 1...2 мин) регистрируются значения ИП (η_i), затем двигатель переводится на исходный режим работы.

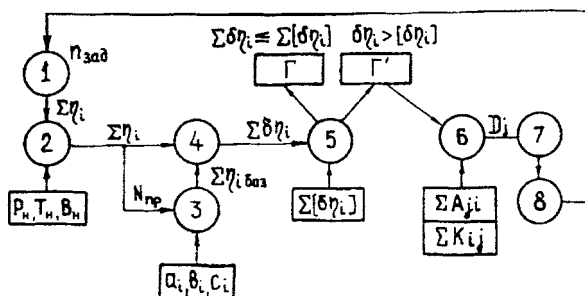


Рис. 12. Алгоритм диагностирования ГТД по
термогазодинамическим параметрам

2. С использованием формул (графиков) и параметров атмосферы в момент проверки (P_n, T_n, B_n) значения ИП приводятся к САУ ($\eta_{i пр}$).

3. С использованием дроссельных характеристик двигателя, представленных в виде графиков или коэффициентов полинома (a_i, b_i, c_i), вычисляются приведенные к заданному режиму ($N_{зад}$) исходные (базовые) значения ИП ($\eta_{i баз пр}$).

4. Вычисляются относительные отклонения ИП ($\delta\eta_i$).

5. Проводится оценка работоспособности двигателя путем сравнения отклонений ИП ($\delta\eta_i$) с их предельно допустимыми значениями [$\delta\eta_i$]; если при этом отклонения всех ИП не выйдут за границы допусков, то ставится диагноз "годен" (G), а если хотя бы у одного ИП отклонение превышает допустимое - "негоден" (\bar{G}).

6. С использованием метода знаков или по величине "невязки" проводится определение причины недопустимого отклонения ИП (распознавание неисправного узла).

7. С использованием средств локального диагностирования проводится подтверждающий контроль неисправного узла (осмотр проточной части, измерение величины износа деталей и т.д.).

8. При наличии возможности производятся работы по устранению неисправности с последующим запуском и опробованием двигателя.

16. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТС ОБЪЕКТОВ

Задача прогнозирования ТС связывается с проверкой работоспособности и определением остаточных ресурсов объектов. Прогнозы базируются на результатах математической обработки данных об эволюции (изменении) ТС объектов с наработкой. При обработке данных используются различные методы регрессионного анализа, например, метод наименьших квадратов. Прогнозная модель объекта в этом случае представляет собой сглаженный временной ряд дискретных значений ДП, описываемый линейной (реже степенной) зависимостью вида:

$$\hat{\eta}_t = \eta_0 + K_\eta \cdot t,$$

где η_0 - исходное (базовое) значение ДП;

K_η - показатель изменения ДП с наработкой.

С использованием прогнозных моделей можно определить прогнозное значение ДП на момент текущей $\hat{\eta}_i$ и любой последующей проверки $\hat{\eta}_{i+n}$, где n - число шагов прогнозирования, а также величину остаточного ресурса \hat{t}_{pi} (рис. 13).

Вычисление значений параметров при этом проводится по формулам:

$$\hat{\eta}_i = \eta_0 + K_{\eta_i} \cdot t_i; \hat{\eta}_{i+n} = \hat{\eta}_i + n \cdot K_{\eta_i} \cdot \tau; \hat{t}_{pi} = ([\eta] - \hat{\eta}_i) / K_{\eta_i},$$

где $[\eta]$ - предельно-допустимое значение ДП;

τ - периодичность проверок;

t_i - наработка объекта к моменту проверки;

K_{η_i} - значение показателя изменения параметра с наработкой на момент текущей проверки;

n - число шагов прогнозирования.

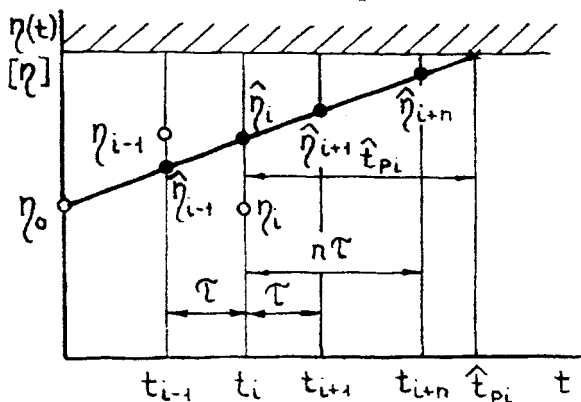


Рис. 13. Схема прогнозирования ТС объектов

Сложность решения задач прогнозирования заключается в определении значений показателя K_{η} в условиях случайного нагружения и значительных разбросов прочностных характеристик объектов. В силу этого прогнозирование обычно ведется в вероятностном аспекте с учетом заданной достоверности прогноза (вероятности невыхода ДП за границу допуска на

прогнозируемом интервале наработки). Кроме того, учитывается степень перемешивания реализаций ДП.

В общем случае различают процессы изменения ТС объектов с наработкой со слабым, умеренным и сильным перемешиванием реализаций ДП.

При слабом перемешивании реализаций ДП траектории процессов изменения ТС объектов с наработкой практически не пересекаются, что позволяет проводить индивидуальное прогнозирование.

При этом используются данные об изменении ТС каждого объекта в отдельности.

При сильном перемешивании пересекаются траектории практически всех процессов, поэтому прогнозирование ТС проводится на основе данных об изменении ТС всех находящихся под наблюдением однотипных объектов.

При умеренном перемешивании пересекается только некоторая часть траекторий, поэтому прогнозирование проводится на основе данных об эволюции ТС как проверяемого, так и других однотипных объектов.

17. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТС ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ СТЕПЕНИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РЕАЛИЗАЦИЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Степень перемешивания реализаций ДП определяется с использованием коэффициента корреляции R , значение которого рассчитывается по формуле (рис. 14):

$$R = \frac{\sum_{k=1}^N [(\eta_1 - \bar{\eta}_1) \cdot (\eta_2 - \bar{\eta}_2)]}{N \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2},$$

где N - число анализируемых реализаций ДП (наблюдаемых объектов);

η_1, η_2 - текущие значения ДП k -й реализации при наработках t_1 и t_2 ;

$\bar{\eta}_1, \bar{\eta}_2$ - средние значения ДП k -й реализации при наработках t_1 и t_2 ;

σ_1, σ_2 - СКО значений ДП при наработках t_1 и t_2 .

В случае $1 > R \geq 0,7$ имеет место слабое, в случае $0,7 > R \geq 0,3$ - умеренное, а в случае $0,3 > R \geq 0$ - сильное перемешивание реализаций ДП.

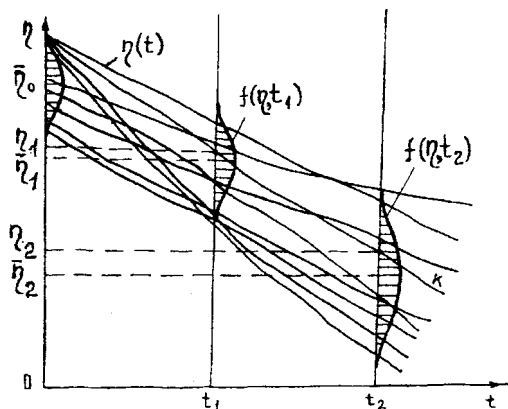


Рис. 14 .Схема определения коэффициента корреляции R

При слабом перемешивании (рис. 15а) проводится индивидуальное прогнозирование ТС объектов. Значение показателя $K_{\eta_{iu}}$ при этом определяется индивидуально для каждого объекта путем математической обработки его временного ряда значений ДП, в который включается и результат текущей проверки (η_i). Обработка данных проводится с использованием методов регрессионного анализа, например метода наименьших квадратов.

При сильном перемешивании (рис. 15б) прогнозирование проводится с учетом данных об эволюции ТС всех наблюдаемых объектов. Значение $K_{\eta_{si}}$ в этом случае определяется путем математической обработки временных рядов значений ДП, включая и результат текущей проверки исследуемого объекта. Расчеты проводятся по методике, аналогичной опре-

делению коэффициента корреляции R . Верхние значения ДП η_1^g, η_2^g , а также показатель $K_{\eta si}$ при этом вычисляются по формулам (рис. 15):

$$\eta_1^g = \bar{\eta}_1 + U_\gamma \cdot \sigma_1; \eta_2^g = \bar{\eta}_2 + U_\gamma \cdot \sigma_2;$$

$$K_{\eta si} = (\eta_2^g - \eta_1^g) / (t_2 - t_1),$$

где U_γ - квантиль нормального распределения, соответствующий доверительной вероятности γ .

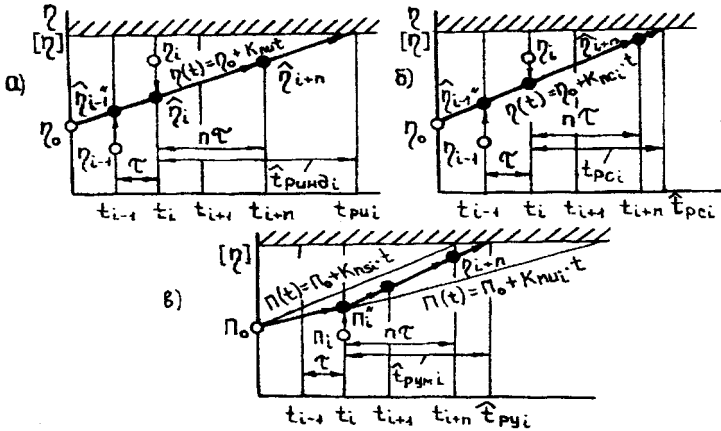


Рис. 15. Схемы прогнозирования ТС объектов при слабом (а), сильном (б) и умеренном (в) перемешивании реализаций ДП

При умеренном перемешивании (рис. 15в) прогнозирование проводится по комбинированной схеме. Для этого собираются статистические данные об эволюции ТС всех наблюдаемых объектов, на основе которых определяются значения $K_{\eta mi}$ и $K_{\eta si}$. Прогнозные значения ДП на текущую и последующие проверки, а также остаточный ресурс при этом вычисляются по формулам:

$$\hat{\eta}_i = \eta_0 + K_{\eta mi} \cdot t_i; \hat{\eta}_{i+n} = \hat{\eta}_{i+n} + K_{\eta si} \cdot n \cdot \tau;$$

$$\hat{t}_p = ([\tau] - \hat{\eta}_i) / K_{\eta si}$$

Достоверность прогноза во всех случаях зависит от точности определения значения K_{η_i} , которая, в свою очередь, зависит от объема статистических данных об эволюции ТС объектов с наработкой и доверительной вероятности, принятой при проведении расчетов. При повышенных требованиях к точности прогнозов расчеты ведутся по "худшей" реализации ДП, т.е. по верхней (ВДГ) или нижней (НДГ) доверительной границе разброса значений ДП.

18. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПО ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Диагностирование объектов, основанное на сопоставлении текущих значений ДП с их предельно-допустимыми (граничными) значениями (допусковый контроль), в ряде случаев не обеспечивает необходимой оперативности получения информации о моментах возникновения неисправностей. Это в первую очередь относится к тем объектам, у которых с высокой вероятностью можно ожидать возникновения быстропротекающих процессов изменения ТС. Хорошие результаты при распознавании таких неисправностей могут быть получены при использовании методов ТД, основанных на анализе тенденции изменения ДП с наработкой.

В общем случае изменение ТС объекта с наработкой при периодических проверках представляется в виде дискретного временного ряда значений ДП. Текущее значение параметра η_i при этом можно выразить через его текущий уровень a_{ji} и величину случайного отклонения уровня параметра ε_i :

$$\eta_i = a_{ji} + \varepsilon_i.$$

С другой стороны, по результатам предыдущих проверок значение η_i можно выразить через текущий уровень параметра при предыдущей проверке $a_{(j_i-1)}$, текущее значение показателя

теля роста уровня a_{2i} и величину случайного отклонения показателя роста уровня u_i :

$$\eta_i = a_{1(i-1)} + a_{2i} + u_i.$$

Полученное выражение позволяет описать ряд типовых тенденций изменения ТС объектов с наработкой, к которым относятся: тренд, ускоренный тренд, скачок, выброс и разброс (рис. 16).

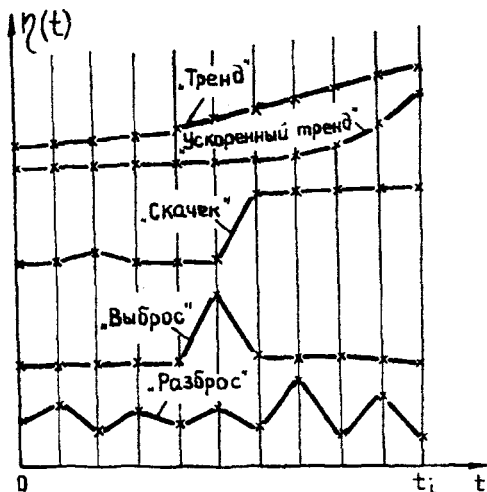


Рис. 16. Типовые тенденции изменения ДП объектов с наработкой

Тренд характеризуется устойчивым изменением уровня ДП, т.е. $a_{1(i-2)} < a_{1(i-1)} < a_{1i}$, при $a_2 = \text{const}$. Данная тенденция изменения ДП с наработкой характерна для объектов с медленно протекающими процессами изменения ТС (износ, старение, усталость и т.д.). Критерием работоспособности объекта при наличии тренда ДП служит условие $a_{2i} > [a_2]$.

Ускоренный тренд характеризуется устойчивым изменением показателя роста уровня ДП, т.е. $a_{2(i-2)} < a_{2(i-1)} < a_{2i}$. Данная тенденция характерна для конечных стадий протекания практически всех постепенных отказов (разрушение подшипников, ка-

чающих узлов насосов, прогар сопловых лопаток турбин и т.д.). Как правило, в случае выявления ускоренного тренда ставится диагноз "негоден" вне зависимости от положения η_i относительно его граничного значения [7].

Так, например, прирост концентрации железа в моторном масле ГТД более 0,1 г/т за час наработки обычно свидетельствует о возникновении патологического процесса изнашивания подшипников опор роторов и служит основанием для прекращения эксплуатации двигателя вне зависимости от общего содержания железа в масле.

Скачок характеризуется ступенчатым изменением уровня ДП с сохранением исходной тенденции изменения ТС объекта, т.е. $a_{1(i-2)} < a_{1(i-1)} = a_{1i}$. Данная тенденция характерна для разнообразных эксплуатационных повреждений конструкций (повышение перепада давления при засорении фильтров кристаллами льда, падение давления масла при зависании редукционного клапана насоса, повышение уровня вибрации ГТД при обрыве лопаток и т.д.). Критерием работоспособности объекта при возникновении скачка ДП служит условие $\Delta a_{1i} < [\Delta a_1]$. В случае выявления недопустимого скачка уровня ДП ставится диагноз "негоден" вне зависимости от положения η_i относительно его граничного значения [7].

Так, например, скачкообразное повышение уровня вибрации ГТД более 3 мм / с служит характерным признаком разрушения элементов роторов (лопаток, дисков, бандажных полок и т.д.) и является основанием для прекращения их эксплуатации.

Выброс характеризуется ступенчатым изменением уровня ДП с последующим возвратом его к исходному значению, т.е. $a_{1(i-2)} > a_{1(i-1)} < a_{1i}$. Данная тенденция характерна для случайных отклонений режимов работы объектов под воздействием внешних и внутренних факторов (попадание ЛА в зоны повышенной турбулентности атмосферы, попадание воды в топливо, засорение жиклеров карбюратора, замыкание электродов свечей зажигания и т.д.). Информативность "выбросов" относительно невелика, поэтому их параметры обычно не

нормируются. Как правило, данная тенденция служит дополнительной информацией при распознавании неисправностей.

Разброс характеризуется наличием значительных случайных отклонений уровня ДП, т.е. повышенными значениями ε_i и u_i . Информативность "разбросов" относительно невелика, поэтому их параметры обычно не нормируются. Большие "разбросы" характерны, например, для результатов измерений уровня вибраций ГТД, концентрации продуктов изнашивания в моторном масле и т.д. В этих случаях для лучшего выделения устойчивых тенденций (трендов, скачков) прибегают к математическому сглаживанию временного ряда.

19. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ АНАЛИЗЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

При наличии больших случайных отклонений значений ДП (разбросов), возникающих вследствие воздействия на объекты разнообразных внешних и внутренних факторов, решение задачи распознавания устойчивых закономерностей (тенденций) изменения ТС затрудняется. Для облегчения решения задачи прибегают к математическому сглаживанию временного ряда значений ДП. При этом используются различные методы математического сглаживания: наименьших квадратов, текущего среднего, экспоненциальной средней, байесовское и другие.

Сглаженный временной ряд значений ДП представляет собой прогнозную модель объекта, отражающую общие закономерности изменения его ТС с наработкой. Для раннего распознавания неисправностей модель должна обладать высокой чувствительностью к устойчивым тенденциям изменения ТС объекта (тренду, скачку), но относительно низкой чувствительностью к случайным отклонениям ДП (выбросам, разбросам). Данное свойство модели принято называть адап-

тивностью, т.е. приспособляемостью к заданным условиям применения. Для обеспечения высокой адаптивности модели при сглаживании временных рядов обычно используется метод текущего среднего или экспоненциального среднего.

Прогнозное значение параметра на момент текущей проверки $\hat{\eta}_i$ при сглаживании ряда по методу текущего среднего рассчитывается по формуле:

$$\hat{\eta}_i = (\sum_{k=1}^N \eta_k) / N,$$

где N - базовое число измерений ДП, включая и текущее;

η_k - значение ДП при k -м измерении.

При экспоненциальном сглаживании прогнозное значение параметра рассчитывается по рекуррентной формуле:

$$\hat{\eta}_i = \hat{\eta}_{i-1} + \alpha \cdot (\eta_i - \hat{\eta}_{i-1}),$$

где $\hat{\eta}_{i-1}^*$ - прогнозное значение ДП при предыдущей проверке;

α - коэффициент сглаживания;

η_i - текущее значение ДП.

Степень сглаживания временного ряда зависит от выбора параметров N и α , которые обычно находятся в пределах $N = 15 \dots 200$, $\alpha = 0,01 \dots 0,1$ для устойчивых тенденций и $N = 5 \dots 10$, $\alpha = 0,15 \dots 0,3$ - для неустойчивых. В противном случае последние могут быть пропущены при проведении анализа тенденций изменения ДП.

Таким образом, в зависимости от ожидаемой тенденции изменения ТС объекта и величины разброса значений ДП должны выбираться оптимальные значения N и α . При этом необходимо учитывать:

- что в текущем среднем вес всех наблюдений постоянен и равен $1/N$;
- в экспоненциальном среднем вес текущего наблюдения

равен коэффициенту сглаживания (α), а вес предыдущих убывает экспоненциально по мере удаления от текущего наблюдения;

- коэффициент сглаживания (α) и число наблюдений (N) связаны между собой зависимостями $\alpha = 2/(N + 1)$ и $N = (2 - \alpha)/\alpha$.

Иногда в целях лучшего выявления устойчивых закономерностей (тенденций) прибегают к двойному экспоненциальному сглаживанию временного ряда. Прогнозные значения параметра $\hat{\eta}_i$ при этом рассчитываются по формуле:

$$\hat{\eta}_i = \hat{\eta}_{i-1} + \alpha \cdot (\hat{\eta}_i - \hat{\eta}_{i-1}).$$

Необходимо отметить, что для всех прогнозных моделей характерно запаздывание времени получения диагностической информации, которое тем больше, чем больше значение N и меньше значение α (рис. 17).

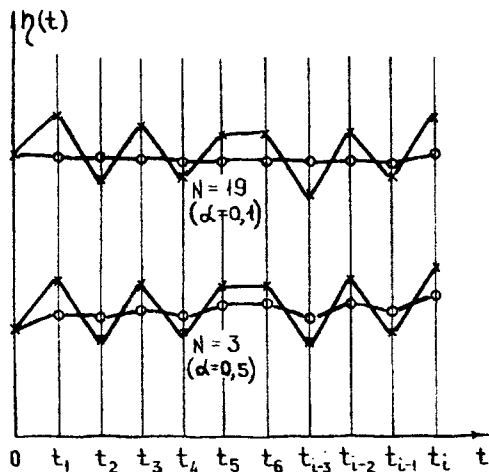


Рис. 17. Прогнозные модели объекта при различных значениях коэффициента сглаживания α

В качестве примера рассмотрим случай распознавания разрушения внутреннего кольца соплового аппарата первой ступени турбины двигателя НК-8-2У по тенденции изменения ДП. При возникновении данной неисправности происходит постепенное повышение температуры газов за турбиной. Изменение температуры с наработкой имеет тенденцию "ускоренный тренд", который может быть обнаружен за 4 часа до разрушения при коэффициенте сглаживания $\alpha = 0,2$ или за 8 часов при $\alpha = 0,15$. При отсутствии сглаживания, а также при $\alpha > 0,25$ неисправность практически не выявляется. При $\alpha < 0,1$ запаздывание информации становится настолько большим, что неисправность успевает развиваться в разрушение (отказ).

20. ПОИСК НЕИСПРАВНОСТЕЙ (ДЕФЕКТОВ)

Одной из основных задач, для решения которой предназначаются системы ТД, является поиск (распознавание) неисправностей и причин их возникновения (дефектов). При этом под "дефектом" понимается каждое отдельное несоответствие свойств объекта требованиям, установленным нормативно-технической документацией. Одна и та же неисправность может быть следствием появления различных дефектов.

Так, например, повышение температуры масла на входе в двигатель (неисправность масляной системы) может явиться следствием засорения масляного радиатора, разрушения приводного валика масляного насоса и т.д. (дефекты масляной системы).

Результатом ТД при поиске дефектов является указание о месте, виде, а при необходимости и причине появления неисправности объекта. Основной характеристикой ТД при по-

иске дефектов служит глубина поиска, определяемая степенью детализации объекта (система - агрегат - узел - деталь).

Поиск дефектов является важной составной частью работ, выполняемых при ТО и Р АТ. При этом высокая сложность объектов зачастую приводит к тому, что для выявления дефекта приходится проводить проверку практически всех структурных элементов. Увеличение числа проверок приводит к повышению трудоемкости и стоимости работ, а также к увеличению простоев ЛА. Подсчитано, что из 10 минут, затраченных на устранение неисправностей функциональных систем, 9 приходится на поиск дефекта.

Эффективность поиска в общем случае характеризуется рядом количественных показателей, в число которых входят: необходимое число проверок, время, трудоемкость и стоимость работ, связанных с выявлением дефекта. Повышение эффективности поиска достигается путем совершенствования алгоритмов ТД, которые устанавливают состав и очередность проведения проверок, а также правила расшифровки их результатов.

В зависимости от задачи и условий ТД алгоритмы поиска дефектов составляются для объекта в целом или для его составных частей, с жесткой или гибкой программой поиска, с условной или безусловной остановкой, общие или рабочие.

Алгоритмы с жесткой программой поиска составляются на основе априорной информации (получаемой до проведения ТД), поэтому в них заранее задается состав и очередность проведения проверок. Алгоритмы с гибкой программой обычно базируются на апостериорной информации (получаемой в ходе ТД), поэтому они не содержат четких указаний о составе и очередности проверок, которые уточняются в ходе поиска.

Алгоритмы с безусловной остановкой реализуются до момента проведения последней из предусмотренных проверок, в то время как алгоритмы с условной остановкой реализуются до момента отыскания первого дефекта.

Общие алгоритмы содержат все проверки, необходимые для выявления типовых дефектов объекта, а рабочие - только ту часть проверок, которые можно провести в конкретных условиях (ситуации) с учетом заданной вероятности выявления дефекта, времени проведения работ и т.д.

При составлении общих алгоритмов каждая проверка рассматривается как способ разделения множества неисправных состояний объекта на ряд подмножеств, в одно из которых входит отказавший элемент (дефект). Алгоритмы поиска обычно представляются в виде ориентированного графа (рис. 18).

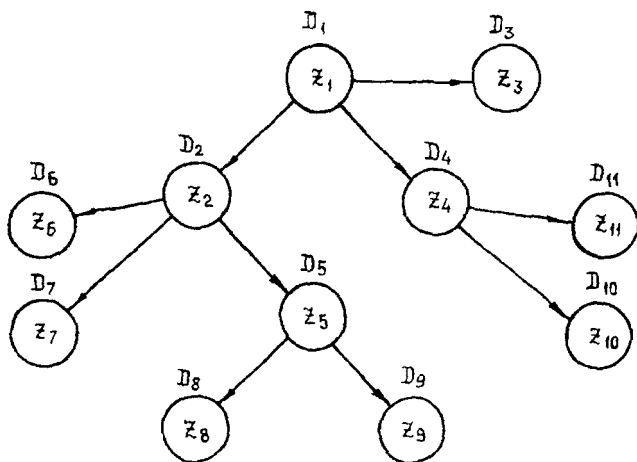


Рис. 18. Общий алгоритм поиска дефектов

Вершина графа Z_1 , в которую не заходит ни одна дуга, называется начальной. Соответствующая ей проверка разбивает полное множество неисправностей D_1 на три подмножества - D_2, D_3, D_4 , которые она не различает. Подмножества D_2, D_4 и D_5 соответствуют внутренним вершинам графа и подлежат дальнейшему разбиению на подмножества проверками Z_2, Z_4 и Z_5 . Подмножества D_3, D_6, D_7, D_8 и т.д. соответствуют висячим вершинам графа и дальнейшему разбиению не под-

лежат. Выдача результата поиска (прекращение поиска) происходит в момент достижения любой висячей вершины (алгоритм с условной остановкой) или в момент проведения последней проверки (алгоритм с безусловной остановкой).

Общие алгоритмы поиска позволяют реализовать проверки в различных очередностях, которые отличаются числом проверок, необходимых для выявления дефекта. Так, например, для выявления неисправности D_9 проверки можно провести в очередности $Z_1 - Z_4 - Z_2 - Z_5 - Z_9$ или $Z_1 - Z_2 - Z_5 - Z_9$. Очевидно, что второй вариант поиска предпочтительнее первого. Для выбора оптимального состава и очередности проверок необходимо располагать информацией о вероятностях возникновения неисправностей, времени и трудоемкости проведения проверок. Данный подход реализуется при составлении рабочих алгоритмов (программ) поиска.

Составлению алгоритмов поиска обычно предшествует построение логических моделей объектов, которые также представляются в виде ориентированного графа причинно-следственных связей (рис. 19), который отражает действующие в объекте причинно-следственные связи между типовыми дефектами (причинами) и неисправностями (следствиями).

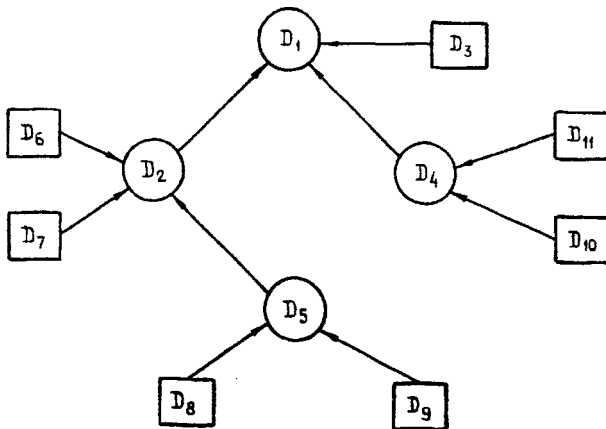


Рис. 19. Граф причинно - следственных связей

В начальную вершину графа вводится неисправность D_1 , которая может явиться следствием возникновения всех различаемых неисправностей и дефектов объекта. Во внутренние вершины вводятся комплексные неисправности D_2, D_4, D_5 , а в висячие - элементарные неисправности (дефекты) D_6, D_7, D_8 и D_9 . Как правило, при построении графа причинно-следственных связей учитываются только те неисправности и дефекты, которые доступны для наблюдения (проверки) и представляют практический интерес.

21. РАБОЧИЕ АЛГОРИТМЫ ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ (ДЕФЕКТОВ)

В практике эксплуатационной диагностики при поиске дефектов обычно используются рабочие алгоритмы (программы), которые составляются на основе общих алгоритмов с учетом реальных условий (ситуации) проведения работ. Необходимость применения рабочих алгоритмов диктуется наличием ограничений на время поиска и устранения неисправностей при проведении ТД. При этом обычно используются алгоритмы с жесткой программой поиска и условной остановкой, т.е. в них заранее устанавливаются состав и очередность проверок, которые проводятся до момента выявления первого дефекта. Алгоритмы составляются для объектов в целом или для их составных частей в зависимости от необходимой глубины диагностирования.

Как правило, рабочие алгоритмы содержат только некоторую часть типовых проверок, предусмотренных общим алгоритмом, состав которых отвечает принятому критерию оптимальности поиска. В качестве такого критерия обычно используется показатель минимума времени на поиск и устранение дефекта. Состав и очередность проверок при этом устанавливается с учетом предписаний общего алгоритма, а также имеющейся информации о вероятностях возникновения дефектов P_i и трудоемкостях (времени) проведения проверок T_j .

Применительно к объектам, составные части которых не имеют функциональных связей (неработающие системы), проводятся индивидуальные проверки структурных элементов. Очередность проверок при этом устанавливается по принципу "от простого - к сложному", "возрастающей трудоемкости", "проверки слабых точек" или "минимальной трудоемкости".

Принцип "от простого - к сложному" обычно используется при отсутствии информации о значениях P_i и T_j . Очередность проверок в этом случае устанавливается, исходя из личного опыта исполнителя (интуитивно), начиная с простейших проверок наиболее доступных элементов и постепенно переходя к более сложным работам.

Принцип "возрастающей трудоемкости" используется при наличии информации о значениях T_j и примерно одинаковых значениях P_i . Очередность проверок в этом случае устанавливается, исходя из условия $T_1 < T_2 < \dots < T_j < \dots < T_k$, где k - число проверок, отвечающих заданному критерию оптимальности поиска.

Принцип "проверки слабых точек" используется при наличии информации о значениях P_i и примерно одинаковых значениях T_j . Очередность проверок в этом случае устанавливается, исходя из условия $P_1 > P_2 > \dots > P_i > \dots > P_k$.

Принцип "минимальной трудоемкости" используется при наличии информации о значениях P_i и T_j . Очередность проверок в этом случае устанавливается, исходя из условия $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \dots > \varepsilon_i > \dots > \varepsilon_k$, где $\varepsilon_i = P_i / T_j$.

Состав проверок, входящих в рабочие алгоритмы, устанавливается с учетом конкретных условий (ситуации) поиска, которая характеризуется временем $T_{\text{дир}}$, отведенным на проведение работ по поиску и устранению дефекта. В практике эксплуатационной диагностики обычно рассматриваются три типовые ситуации проведения работ:

1. Резерв времени на поиск и устранение дефекта практически отсутствует.

2. Имеется некоторый ограниченный резерв времени $T_{дир}$.

3. Ограничения на время поиска и устранение дефекта практически отсутствуют.

В первой ситуации (обеспечение вылета ЛА) имеется небольшой резерв времени (20...30 минут), в течение которых можно выявить и устранить только простейшие дефекты (заменить предохранитель, лампу сигнализации, электронный блок и т.д.). В этом случае в программу поиска вводятся одна-две проверки, очередность проведения которых обычно устанавливается по принципу "от простого - к сложному", а состав проверок выбирается из условия:

$$\sum_{j=1}^k t_{j\max} = \min,$$

где $t_{j\max}$ - максимальная продолжительность j -й проверки с устранением дефекта.

Во второй ситуации (задержка рейса, оперативное ТО) имеется определенный резерв времени $t_{дир}$, в течение которого можно выявить и устранить даже относительно сложный дефект. Очередность проверок в этом случае обычно устанавливается по принципу "проверки слабых точек" или "возрастающей трудоемкости", а состав проверок выбирается из условия:

$$\sum_{j=1}^k t_{j\max} = t_{дир}.$$

В третьей ситуации (устранение неисправности, периодическое ТО, ремонт) время на поиск и устранение дефекта практически не ограничивается, поэтому в программу поиска можно ввести все проверки, предусмотренные общим алгоритмом. Очередность проверок в этом случае обычно устанавливается по принципу "минимальной трудоемкости", а состав проверок выбирается из условия:

$$\sum_{j=1}^k t_j = \min.$$

Если в первой ситуации выявить и устранить дефект не удается, то переходят ко второй (объявляется задержка рейса). При отсутствии положительного результата и во второй ситуации - переходят к третьей (ЛА переводится в состояние "устранение неисправности" или "ремонт").

22. ПОИСК НЕИСПРАВНОСТЕЙ (ДЕФЕКТОВ) ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Применительно к объектам, составные части которых функционально взаимосвязаны (работающие системы), наряду с проверкой отдельных элементов возможны групповые проверки составных частей. Алгоритмы поиска дефектов при этом обычно составляются по гибкой программе, т.е. каждая последующая проверка выбирается в зависимости от результата предыдущей. Сущность поиска дефекта в этом случае заключается в последовательном разбиении системы на два участка, один из которых подвергается проверке. В зависимости от ее результата определяется участок, в состав которого входит отказавший элемент (дефект). Дефектный участок вновь разбивается на две части, одна из которых подвергается проверке. Разбиение системы на участки проводится до тех пор, пока при очередной проверке не будет выявлен отказавший элемент. Отказавшим элементом, в зависимости от требуемой глубины поиска, может быть система, участок или агрегат.

Принцип составления алгоритмов поиска в этом случае называется "методом средних точек". На практике используются несколько вариантов данного метода: "половинного разбиения", "равных вероятностей", "минимальной продолжительности", "максимальной информативности" и др.

Принцип "половинного разбиения" используется в тех случаях, когда отсутствует информация о вероятностях появ-

ления дефектов P_i и времени (трудоемкостях) проведения проверок T_j . Система каждый раз разбивается на два участка, содержащих примерно одинаковое число элементов, один из которых подвергается проверке. При определении числа разбиений (проверок), необходимого для выявления дефекта, система, содержащая N - элементов, представляется в виде:

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

где R - число элементов сверх полной степени числа 2;

m - целое положительное число.

В случае $R = 0$ минимальное число проверок составит m , а в случае $R > 0$ минимальное число проверок - $m + 1$.

Принцип "равных вероятностей" используется при различных значениях P_i и примерно одинаковых значениях T_j . На каждом шаге разбиения системы на участки стремятся к обеспечению равенства сумм вероятностей отказов структурных элементов, входящих в состав образующихся участков, т.е. к выполнению условия:

$$\sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^N P_i, \text{ при этом } \sum_{i=1}^N P_i = 1.$$

Реализация данного принципа позволяет уменьшить число проверок, необходимых для выявления дефекта, в особенности при наличии существенных различий в значениях P_i .

Принцип "минимальной продолжительности" используется при наличии существенных различий в значениях P_i и T_j . Сокращение времени поиска при этом достигается за счет дополнительного учета значений T_j . При выборе очередного проверяемого участка рассчитывается значение показателя $\varepsilon_i = P_i / T_j$. Первоочередной проверке подвергается тот участок, у которого величина ε_i имеет большее значение.

Принцип "максимума информации" используется при наличии информации о значениях P_i и t_j в системах, содержащих большое число функционально взаимосвязанных элементов.

Неопределенность состояния (энтропия) системы, состоящей из N - элементов, определяется по формуле:

$$H(N) = - \sum_{i=1}^N P_i \cdot \log P_i.$$

В случае равных вероятностей отказов элементов $P_i = 1/N$ энтропия системы определяется по формуле:

$$H(N) = \log N.$$

Каждая проверка Z_j несет некоторое количество информации $I(Z_j)$ о состоянии системы, в силу чего ее энтропия уменьшается. Критерием достаточности информации для определения ТС системы (выявления дефекта) служит условие:

$$I(K) = H(N),$$

$$\text{где } I(K) = \sum_{j=1}^K I(Z_j);$$

K - число проверок.

Если при проверке одновременно проверяется n - элементов, сумма вероятностей отказов которых составляет:

$$P(Z_j) = \sum_{i=1}^n P_i,$$

то количество получаемой информации составит:

$$I(Z_j) = - [P(Z_j) \cdot \log P(Z_j) + (1 - P(Z_j)) \cdot \log (1 - P(Z_j))].$$

Поиск отказавшего элемента D_i начинается с проверки Z_j , несущей максимум информации о состоянии системы. Проверка разбивает элементы системы на две подгруппы: на изменение состояний которых она реагирует (1) и не реагирует (0).

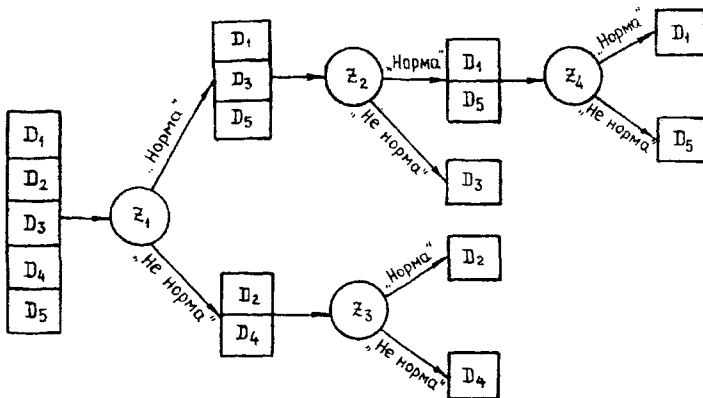


Рис. 20. Алгоритм поиска неисправностей (дефектов) функциональных систем при реализации принципа "максимума информации"

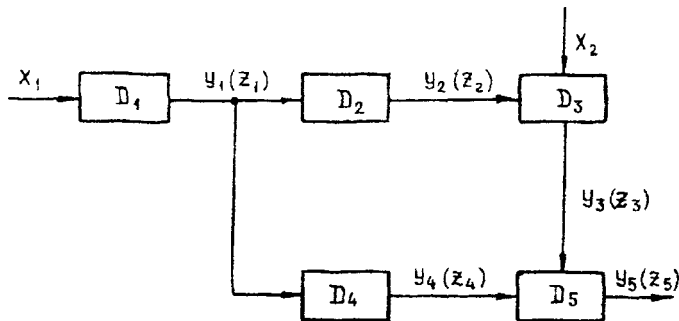


Рис. 21. Функциональная модель системы

Вторая проверка выбирается по максимуму информации для образовавшихся подгрупп и т.д. Разбиение системы на подгруппы продолжается до момента отыскания отказавшего элемента. Алгоритм поиска в этом случае обычно представляется в виде ориентированного графа (рис. 20).

Состав проверок и их информативность определяются с

использованием функциональной модели системы (рис. 21), которая составляется с учетом действующих в системе функциональных связей между структурными элементами.

Взаимосвязь между результатами проверок и состояниями системы обычно представляется в виде диагностической матрицы:

D_i	Z_1	Z_2			P_i
D_1	1	1			P_1
D_2	0	1			P_2
$I(Z_i)$	$I(Z_1)$	$I(Z_2)$			$\sum P_i = 1$

С использованием диагностической матрицы проводится минимизация числа измеряемых параметров системы (проверок). При этом проверки, реагирующие на все Z_j и не реагирующие ни на одно состояние системы, исключаются, а из двух проверок, дающих одинаковые результаты, выбирается простейшая.

23. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БОРТОВЫХ СРЕДСТВ ТД

Современные ЛА оснащаются бортовыми системами контроля, обеспечивающими проверку работоспособности и правильности функционирования основных систем, а также поиск типовых неисправностей. В их состав входит большое число (до 150 штук) разнообразных контрольно-измерительных и пилотажно-навигационных приборов, указателей и сигнализаторов, часть которых (до 10 штук) используется и для целей ТД. Эффективность ТД при этом зависит не только от состава контролируемых параметров, диапазона и точности измерений, но и от уровня автоматизации контрольно-диагностических операций.

На начальных этапах развития АТ для получения и обработки диагностической информации в полете требовалось активное участие экипажа. Качество ТД при этом во многом зависело от квалификации пилотов, их умения быстро и точно регистрировать и обрабатывать показания приборов.

Следующим этапом явилось создание бортовых систем контроля, обеспечивающих автоматический сбор, первичную обработку и регистрацию диагностической информации с помощью бортовых самописцев (типа МСРП) для ее дальнейшего использования на земле. Однако оперативность и точность постановки диагнозов в полете по прежнему зависели от квалификации экипажа.

На современном этапе успешно решается задача полной автоматизации бортового контроля. При этом диагностическая информация поступает к экипажу в "готовом" виде с указанием текущих значений контролируемых параметров, характера возникающих неисправностей и рекомендаций по предупреждению возможных последствий. Для этого в состав систем контроля вводятся специализированные ЭВМ, предназначенные для оперативной обработки полетной информации.

Наряду с этим в бортовых системах контроля широко используются новейшие типы контрольно-измерительных приборов (радиационные термометры, анализаторы спектров вибраций и т.д.), позволяющие увеличить объем диагностической информации, а следовательно и точность ТД. Успешно решается и проблема повышения достоверности ТД, для чего в системах предусматриваются логические устройства для обработки диагностической информации. При этом сигнал "отказ" поступает к экипажу только в тех случаях, когда информация об отказе будет получена по нескольким независимым каналам.

С целью уменьшения числа контрольно-измерительных приборов, устанавливаемых на приборные доски, широко используются дисплейные индикаторы, на которые выводится только необходимая на текущий момент, а также аварийная информация.

Следует отметить, что бортовые системы контроля большинства находящихся в эксплуатации транспортных самолетов (Ту-154, Як-42, Ил-76 и др.) не отвечают современным требованиям, предъявляемым к контролепригодности АТ. В силу этого приходится прибегать к наземной обработке полетной информации, а также к использованию разнообразных средств локального ТД.

В состав бортовых средств контроля, используемых для целей ТД, входят измерители: частот вращения роторов (тахометры); температуры жидкостей и газов (термометры); давления жидкостей и газов (манометры) и вибрации (виброметры). Практически все измерительные приборы выполнены по электродистанционной схеме и содержат датчик-преобразователь неэлектрических величин в электрические сигналы, согласующее устройство и указатель (индикатор).

Параметр "обороты" обладает высокой информативностью, так как позволяет судить о характере протекания рабочих процессов в двигателях, турбохолодильниках и других агрегатах, а также о работе регуляторов, систем защиты и т.д. Так, например, по величине оборотов роторов ГТД судят о работе регуляторов и состоянии проточной части; по времени "выбега" роторов - о состоянии подшипников опор роторов и приводных агрегатов; по величине "скольжения" роторов - о состоянии проточной части, подшипников опор, настройке регуляторов и т.д.

Параметр "температура" также обладает высокой информативностью, так как служит основной характеристикой протекания тепловых процессов в двигателях, турбохолодильниках, теплообменниках и т.д. Так, например, по температуре газов за (перед) турбиной ГТД судят о состоянии проточной части, регуляторов, камеры сгорания и форсунок; по температуре масла на входе (выходе) в двигатель - о состоянии узлов трения, работе масляной системы и ее агрегатов; по температуре воздуха, подаваемого в гермокабину, - о работе системы кондиционирования и состоянии ее агрегатов и т.д.

При использовании радиационных термометров (пирометров) имеется возможность измерять температуру различных элементов конструкции (лопатки и диски турбин, кожухов и жаровых труб камеры сгорания и т.д.), что позволяет судить о работе систем охлаждения, регулирования и т.д.

Параметр "давление" также достаточно информативен, так как позволяет судить о характере протекания рабочих процессов в гидрогазовых системах. Так, например, по величине давления в гидравлической системе судят о работе и состоянии насосов, по скорости изменения давления после отключения насосов - о внутренней герметичности агрегатов и зарядке азотом гидроаккумуляторов; по отношению давлений воздуха на входе и на выходе из ГТД - о величине развиваемой тяги и т.д.

Параметр "расход" также обладает достаточно высокой информативностью и позволяет судить о протекании рабочих процессов в ГТД, гидрогазовых системах, системе кондиционирования воздуха и т.д. Так, например, по величине часового расхода топлива судят о состоянии проточной части и работе регуляторов ГТД; по величине расхода воздуха в системе кондиционирования, необходимого для обеспечения заданного перепада давления - о герметичности гермокабины и работе системы регулирования давления.

Параметр "вибрация" обладает высокой информативностью, так как позволяет судить о состоянии роторов и их опор, протекании рабочих процессов в компрессорах и турбинах ГТД, соосности валов трансмиссий вертолетов и т.д. Так, например, по уровню вибрации корпусов ГТД судят о состоянии элементов роторов (лопаток, дисков, бандажных полок и т.д.); по уровню вибрации фюзеляжей вертолетов - о состоянии трансмиссии, несущего и хвостового винта и т.д. При использовании анализаторов спектра вибрации имеется возможность проводить локализацию неисправностей, т.е. определять причину повышения уровня вибрации.

Следует отметить, что большая часть измеряемых пара-

метров, обладая высокой диагностической ценностью, имеют относительно малый диагностический вес. В силу этого они позволяют достаточно объективно судить о работоспособности объектов, но не приспособлены для распознавания причин возникающих неисправностей (дефектов). С целью повышения глубины диагностирования прибегают к использованию специальных методов обработки диагностической информации, применению комплексных, обобщенных и интегральных ДП, а также средств локального ТД.

24. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СРЕДСТВ ЛОКАЛЬНОГО ТД

К средствам локального ТД относятся мерительные и специальные инструменты (нутромеры, щупы, индикаторы, тензометры, динамометрические ключи и т.д.), методы дефектоскопии (визуальнооптический, магнитопорошковый, токовихревой, ультразвуковой, капиллярный, рентгенографический и т.д.), а также методы, основанные на анализе рабочих жидкостей (дифференциально-магнитный, эмиссионно-спектральный, рентгено-спектральный, колориметрический и др.).

Мерительные и специальные инструменты используются при проверках размеров сопряженных деталей, зазоров в узлах трения и между контактами прерывателя магнето, натяжения тросов, моментов затяжки резьбовых соединений и т.д. Технические характеристики и методики применения инструментальных средств ТД общеизвестны.

Методы дефектоскопии служат для проверки прочностных характеристик конструкции без разрушения. При проведении проверок выявляются разнообразные дефекты конструкции в виде нарушений сплошности материалов (трещины, забоины, очаги коррозии, непровары и шлаковые включения в сварные соединения и т.д.), а также в виде отклонений толщины и химического состава материала деталей и покрытий.

Выбор метода и средств дефектоскопии проводится с учетом характера и локализации ожидаемых дефектов, свойств материалов деталей и покрытий, состояния контролируемых поверхностей, доступности зон контроля, а также требований, предъявляемых к чувствительности, надежности и трудоемкости контроля. Так, например, проверки барабанов колес на отсутствие усталостных трещин проводятся с использованием токовихревого и ультразвукового методов дефектоскопии. При этом трудоемкость токовихревой проверки составляет около 3 чел.-ч и требует разборки колеса, а ультразвуковой проверки - около 0,5 чел.-ч без снятия колес с самолета. В силу высокой надежности и чувствительности токовихревого контроля периодичность проверок, необходимая для обеспечения заданного уровня безотказности, составляет 150 посадок, а при ультразвуковом контроле - 25 посадок. В результате токовихревые проверки можно совместить с периодическими формами ТО (Ф-1), на которых производится плановая переборка колес, а ультразвуковые необходимо проводить на оперативных формах ТО (Ф-Б), имеющих ограниченный резерв времени. В результате предпочтение часто отдают более трудоемкому токовихревому контролю, не влияющему на величину простоя ЛА на ТО.

На сегодняшний день имеется достаточно большой арсенал средств дефектоскопии (дефектоскопов), отличающихся друг от друга как по техническим возможностям, так и по источникам питания, габаритам, весу, универсальности и т.д. Однако в практике эксплуатационной диагностики АТ широкое распространение получили только 6 методов дефектоскопии и около 20 типов дефектоскопов.

Визуально-оптический метод используется для проведения обследования проточной части ГТД на предмет выявления повреждений лопаток компрессоров и турбин, дефектов камеры сгорания, уплотнений и т.д. При этом используются "жесткие" (линзовые) и "гибкие" (волоконные) оптические дефектоскопы (эндоскопы). Первые (Н-200, Н-201, АС, ЭЛЖ и др.)

обладают высокой чувствительностью (разрешение до 100 штр./мм), но требуют оснащения объектов осмотра специальными смотровыми лючками. Вторые (ОД-20Э, ЭВГ, "Olympus" и др.) имеют меньшую чувствительность (разрешение до 20 штр./мм), но менее требовательны к контролепригодности объектов. При контроле выявляются разнообразные поверхностные дефекты (забоины, трещины, очаги коррозии и т.д.) с раскрытием более 0,01 мм.

Магнитопорошковый метод используется при контроле конструкций, изготовленных из ферромагнитных материалов (силовые элементы шасси, крепежные детали планера, силовой установки и т.д.). При этом используются переносные дефектоскопы типа ПМД-70, ДМП-1, 77ПМД-3М и др. При контроле на деталях и узлах выявляются усталостные трещины и разнообразные производственные дефекты (непровары, флокены, волосовины, шлифовочные и термические трещины и т.д.) с раскрытием более 0,001 мм.

Метод вихревых токов используется при контроле конструкций, изготовленных из токопроводящих материалов (барабаны колес, лопасти воздушных винтов, силовые элементы планера и т.д.). При этом используется несколько типов портативных дефектоскопов (ТВД, ВД-1ГА, ППД-1МУ, ВДЦ и др.). При контроле на деталях и узлах выявляются усталостные трещины с раскрытием более 0,01 и длиной более 1 мм, нарушения целостности и толщины покрытий и т.д.

Ультразвуковой эхо-импульсный метод используется при контроле конструкций, изготовленных из различных акустически прозрачных материалов (барабаны колес, лопасти воздушных винтов, лопатки и диски турбин и т.д.). При этом используется несколько типов портативных ультразвуковых дефектоскопов (УД-11ПУ, ДУК-66П, УДМ-3 и т.д.). При контроле на деталях и узлах выявляются дефекты, имеющие площадь более 1 мм² на глубине до 2500 мм. Метод позволяет производить измерения толщины деталей при одностороннем подходе. К недостаткам ультразвукового метода следует от-

нести высокие требования к эксплуатационной дефектоскопической технологичности конструкции и квалификации операторов.

Капиллярные методы (метод красок) используются при контроле конструкций, изготовленных из различных непористых материалов (силовые элементы планера, лопатки и диски турбин и т.д.). В практике эксплуатационной диагностики данный метод применяется в основном для подтверждения результатов токовихревого и ультразвукового контроля. При этом обычно используются комплекты готовых дефектоскопических материалов (ЦАН, "Аэро-12А", "К" и др.). При контроле на деталях и узлах выявляются усталостные трещины с раскрытием более 0,01 мм, очаги межкристаллитной коррозии, растрескивание металлических (хромовых) покрытий и т.д. К недостаткам метода следует отнести сложность подготовки детали к проведению контроля.

Рентгенографический метод широкого распространения в практике эксплуатационной диагностики не получил и используется в основном при проведении капитального ремонта ЛА и двигателей. Контролю подвергаются наиболее ответственные элементы конструкции (сварные соединения, литые детали из легких сплавов, закрытые конструкции, не имеющие подходов для осмотра внутренних поверхностей, и т.д.). В результате контроля выявляются дефекты сборки, сварки и клепки, очаги коррозии на внутренних поверхностях полых деталей и металлургические дефекты, имеющие раскрытие более 0,025 мм и глубину более 1% от толщины детали. При проведении контроля используются портативные, передвижные и стационарные рентгеновские аппараты (РИНА-1Д, РУП-120-5-1, РУП-200 и др.). К недостаткам метода следует отнести низкую чувствительность к усталостным трещинам и сложность защиты технического состава от действия проникающих излучений.

Методы анализа моторных масел используются при контроле технического состояния узлов трения (подшипников

опор роторов ГТД, зубчатых зацеплений коробок приводов, плунжерных пар насосов высокого давления и т.д.). Они позволяют выявлять ранние признаки разрушения трущихся поверхностей деталей по составу, концентрации, скорости накопления и дисперсности продуктов изнашивания в масле. При проведении анализов проб масла обычно используется дифференциально-магнитный, эмиссионно-спектральный или рентгено-спектральный метод.

Дифференциально-магнитный метод используется при проведении анализов проб масла в полевых и лабораторных условиях. При этом определяется концентрация и дисперсность продуктов изнашивания ферромагнитных деталей. По содержанию железа в масле и дисперсности частиц выявляются начальные стадии разрушения подшипников опор роторов ГТД, шестерен редукторов вертолетов и т.д. При проведении анализов используется портативный прибор ПОЖ-М, позволяющий производить определения концентрации продуктов изнашивания в масле с точностью около 0,2 г/т в диапазоне от 0,5 до 20 г/т.

Спектральный метод используется при проведении анализов проб масла в лабораторных условиях. При этом определяется концентрация продуктов изнашивания деталей, изготовленных из различных материалов (железо, медь, серебро, хром и т.д.). По содержанию продуктов изнашивания выявляются начальные стадии разрушения тел качения, сепараторов и колец подшипников опор роторов, подшипников скольжения редукторов и т.д. При проведении анализов используются стационарные установки типа МФС-5, СЛ-12 и др., которые позволяют производить определение концентрации продуктов изнашивания с точностью около 0,1 г/т в диапазоне от 0,1 до 30 г/т.

Рентгено-спектральный метод используется при проведении анализов в полевых и лабораторных условиях. При этом определяется концентрация продуктов изнашивания деталей, изготовленных из различных материалов (железо, медь,

серебро, хром и т.д.). По содержанию продуктов изнашивания в масле выявляются дефекты различных узлов трения. При проведении анализов используются портативные бездифракционные анализаторы рентгеновских спектров типа БАРС. В настоящее время рентгеноспектральный метод успешно используется вместо дифференциально-магнитного и спектрального методов. При этом обеспечивается достаточно высокая повторяемость и чувствительность результатов определений (около 0,1 г/т в диапазоне от 0,5 до 30 г/т). Основным недостатком метода является сложность расшифровки результатов измерений при нахождении в пробе масла нескольких металлов с близкими спектральными характеристиками излучений.

Объем проверок, выполняемых с использованием средств локального диагностирования, постоянно увеличивается, что связано с расширением номенклатуры изделий, эксплуатируемых по техническому состоянию.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978, 348 с.
2. Кеба И.В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. - М.: Транспорт, 1980, 248 с.
3. Дефектоскопия деталей при эксплуатации авиационной техники / Под ред. П.И.Беды. - М.: Воениздат, 1978, 231с.
4. Техническая эксплуатация летательных аппаратов: Учебник для вузов /Под ред. Н.Н.Смирнова. - М.: Транспорт, 1990, 423 с.

Учебное издание

*Макаровский Игорь Мстиславович,
Матейко Олег Николаевич*

**ОСНОВЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

Учебное пособие

Редактор Н. С. Куприядова
Компьютерная верстка О. А. Ананьев

Лицензия ЛР № 020301 от 30.12.1996 г.

Подписано в печать 05.11.2001 г. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 4,7. Усл. кр-отг. 4,5. Уч.-изд. л. 5.0.

Тираж 150 экз. Заказ 116. . Арт. С-23(ДЗ)/2001.

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

ИПО Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443001 г. Самара, ул. Молодогвардейская. 151.