

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ**

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ»**

**Кафедра технической эксплуатации летательных аппаратов
и авиационных двигателей**

О.Ф.Машошин

ДИАГНОСТИКА АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

(информационные основы)

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области эксплуатации авиационной и космической техники для межвузовского использования в качестве учебного пособия

Москва - 2007

ББК 056

М38

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

Рецензенты: д-р техн. и экон. наук, проф. Е.Ю.Барзилович;
д-р техн. наук, проф. В.А.Пивоваров.

Машошин О.Ф.

**М38 Диагностика авиационной техники. Учебное пособие. - М.: МГТУ
ГА, 2007. – 141 с.**

ISBN (978-5-86311-593-1)

В учебном пособии рассматривается комплекс вопросов, связанных с теоретическими основами технической диагностики, с позиций информационного обеспечения процессов диагностирования летательных аппаратов и авиадвигателей.

На фоне рассмотрения классических трактовок и теоретических положений технической диагностики, в пособии изложены вопросы, связанные с информационным потенциалом, как контролируемых параметров, так и методов диагностики и выбора в первую очередь тех из них, которые обладают максимальной информативностью. Также значительное внимание уделено теории информации применительно к решению задач диагностики.

Пособие издается в соответствии с учебным планом и программой специальности 160901 по дисциплине «Диагностика авиационной техники» для студентов дневного отделения IV и V курсов, а также может быть полезным для магистрантов и аспирантов, изучающих проблемы диагностики в авиации.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 06.03.07 г. и Методического совета 13.03.07 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Введение	7
Словарь терминов и понятий	10
Глава 1. Основы технической диагностики	13
1.1. Основные направления технической диагностики	13
1.2. Задачи технической диагностики	14
Глава 2. Теоретические и информационные аспекты технического диагноза	19
2.1. Основные философские воззрения теории информации	19
2.2. Основные информационные законы	27
2.2.1. Закон сохранения информации	27
2.2.2. Основной информационный закон формообразования и развития материи	29
2.2.3. Основной закон термодинамики в информационной трактовке	31
2.2.4. Принцип минимума диссипации	32
2.3. Энтропия и диагностическая информация	33
2.3.1. Энтропия Больцмана-Гиббса-Шеннона в решении прикладных задач	33
2.3.2. Применение Н-теоремы для открытых систем	35
2.3.3. Динамическое и статическое описание сложных движений	36
2.4. Оценка значимости и ценности информации в практических задачах диагностики	37
2.5. Применение информационной энтропии К.Шеннона в задачах распознавания. Выбор критериев информативности	42
Глава 3. Методы диагностики авиационной техники с позиций информативности	47
3.1. Методы диагностики АТ и их возможности	47
3.2. Анализ методов технической диагностики АТ с позиций информативности	51
3.2.1. Тепловые методы и их эффективность	51
3.2.2. Возможности виброакустических методов оценки состояния АТ	55
3.2.3. Эффективность трибодиагностики элементов ГТД	62
3.2.4. Эффективность диагностики жидкостных систем ЛА и АД	70
3.2.5. Эффективность диагностики ГТД по термогазодинамическим параметрам	72
3.2.6. Методы диагностики проточной части ГТД	75
3.3. Методы обобщенной оценки состояния технических систем	80
3.3.1. Методы сверток частных параметров контроля к обобщенному показателю	80
3.3.2. Методы обобщенной оценки состояния технических систем по информационному критерию	87
3.4. Требования к информационному критерию технического состояния АТ	92

Глава 4. Теория информации в решении классификационных задач технической диагностики	95
4.1. Задачи постановки диагноза	95
4.2. Множество возможных состояний ЛА и АД	101
4.3. Параметрическая классификация объекта диагностики на примере двигателя ПС-90А	106
4.3.1. Расчет интенсивности отказов ГТД ПС-90А	111
4.3.2. Оценка средней условной энтропии на промежутке наработки от 0 до 6000 часов	115
4.3.3. Результаты оценки количества и качества диагностической информации	123
Глава 5. Информационное обеспечение процессов диагностирования АТ	128
5.1. Задачи и структура системы сбора и обработки информации	128
5.2. Система информационного обеспечения процессов диагностирования (СИОПД) ГТД	131
5.2.1. Назначение и цели системы	133
5.2.2. Общие требования, предъявляемые к системе	135
5.2.3. Требования к программному обеспечению системы	137
5.2.4. Реализация и совершенствование системы	138
Литература	139

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебная дисциплина «Диагностика авиационной техники» является одной из основных для подготовки студентов Механического факультета. Цель ее преподавания диктуется требованиями квалификационной характеристики студентов – выпускников указанной специальности по приобретению знаний и формированию умений в области управления техническим состоянием самолетов и двигателей ГА в процессе эксплуатации, позволяющие научно и технически обоснованно решать современные вопросы диагностики авиационной техники.

Следует отметить, что в представленном учебном пособии акцент сделан на информационную составляющую часть диагностики, ее основы. На суд читателя наряду с классическим подходом изложения материала предложен и нетрадиционный способ, раскрывающий как техническую сторону диагностики, так и философские воззрения, аспекты – суть формирования потока информации вообще и информационного обеспечения процессов диагностирования в частности.

Согласно Второму началу термодинамики, в окружающем нас мире любое состояние системы, получаемое от различных источников информации, стремится к дезорганизации, и в последствии является нестабильным и разрозненным. В связи с этим важно выявить и уяснить сущность понятия – «информационный потенциал», под которым понимается недоиспользованная возможность учета информационной значимости как объекта диагностики, методов диагностирования, так и контролируемых параметров любой технической системы, подверженной диагностированию.

Таким образом, в настоящем учебном пособии акцентировано внимание на формирование диагнозов с учетом ценности получаемой информации контролируемых параметров, т.е. недоиспользованного их информационного потенциала, что позволит внимательному читателю

дополнить классические представления об исследованиях в области диагностики, и улучшить эффективность практики технической эксплуатации авиационной техники.

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

«В мире нет ничего
постоянного кроме перемен»
Джонатан Смит

ВВЕДЕНИЕ

Термин «**ДИАГНОСТИКА**» греческого происхождения (*diagnostikos*), состоящий из слов - *dia* (между, врозь, после, через, раз) и *gnosis* (знание). Таким образом, слово *diagnostikos* можно трактовать, как способность распознавать. В античном мире диагностиками назывались люди, которые после битв на полях сражений подсчитывали количество убитых и раненых. В эпоху Возрождения - диагностика уже медицинское понятие, означающее распознавание болезни. В XIX - XX вв. это понятие стало широко использоваться в философии, а затем и в психологии, медицине, технике и других областях. В общем смысле, диагностика особый вид познания, находящийся между научным знанием сущности и опознаванием какого-либо единичного явления. Результат такого познания - диагноз, т.е. заключение о принадлежности сущности, выраженной в единичном явлении, к определенному установленному наукой классу.

В свою очередь, распознавание - учение о методах и принципах распознавания болезней и о признаках, характеризующих те или иные заболевания. В широком смысле этого слова процесс распознавания используется во всех отраслях науки и техники, является одним из элементов познания материи, то есть позволяет определять природу явлений, веществ, материалов и конкретных предметов. С философской и логической точек зрения термин «диагностика» правомерно можно использовать в любых отраслях науки. Таким образом *технической диагностикой* называется наука о распознавании (отнесение к одному из возможных классов) состояния технической системы. При диагностировании объект устанавливается путем сопоставления знаний, накопленных наукой, о группе, классе соответствующих объектов.

Введем еще один термин – «индивидуальность». Индивидуальность – это неповторимость объекта, его тождественность, равенство с самим собой. В природе нет, и не может быть двух тождественных друг другу объектов. Индивидуальность объекта выражается в наличии у него неповторимой совокупности признаков, которых нет у другого подобного объекта. Такими признаками для предмета диагностики являются размеры, форма, цвет, вес, структура материала, рельеф поверхности и иные признаки. К примеру, для человека это особенности фигуры, строение головы, лица и конечностей, физиологические особенности организма, особенности психики, поведения, навыки и т.д. Для технических объектов – изменение физико-механических свойств, диагностических критериев, технических параметров в различных условиях функционирования.

Раз объекты материального мира индивидуальны, тождественны самим себе, то им, следовательно, присущи индивидуальные признаки и свойства. В свою очередь эти признаки объектов изменчивы и отображаются на других объектах. Значит отображения также являются индивидуальными, обладающие *свойством изменчивости*.

С другой стороны, все объекты материального мира подвергаются непрерывным изменениям (человек стареет, обувь изнашивается и т.д.). У одних эти изменения наступают быстро, у других - медленно, у одних изменения могут быть значительными, а у других – не столь значимыми. Хотя объекты изменяются постоянно, но в течение определенного времени сохраняют наиболее устойчивую часть своих признаков, которые позволяют осуществить *идентификацию*. Здесь под идентификацией понимается отождествление между закономерностями проявляемых диагностических параметров и тем или иным состоянием объекта. При идентификации конкретного объекта чаще всего обращают внимание на пороговые значения каких-либо физических величин, при этом важную роль играют диагностические признаки, указывающие на изменение состояния объекта в процессе его распознавания. Свойство материальных объектов сохранять

совокупность своих признаков несмотря на их изменения, называется *относительной устойчивостью*.

Необходимо отметить, что словари и энциклопедии все еще отождествляют диагностику и термин «диагноз» чаще с медицинской разновидностью распознавания, между тем, этот вид познания распространен в самых разнообразных областях научной и практической деятельности человека.

Диагностика, как научная дисциплина и как область научно-практической деятельности, является социально обусловленной, изменяющейся в ходе исторического развития общества. Ее современное развитие в XXI веке осуществляется в направлении расширения возможностей более быстрого и точного приближения к цели, распознавания причин отклонений от норм технического объекта. В свою очередь, развитие диагностики характеризуется неравномерностью изменчивости ее отдельных сторон, а также влиянием друг на друга различных признаков и параметров контролируемых объектов с позиций информативности, а зачастую даже с позиций избыточности потока информации. Это касается всех уровней и разделов диагностики.

Надеюсь, что те читатели, которые склонны серьезно задуматься над основными вопросами научного познания, кто имеет тягу к самостоятельному мышлению, кто в поиске нового, необычного, выходящего за привычные рамки, оставят свои отзывы и критические замечания по прочтении данного пособия.

Словарь терминов и понятий

Техническая диагностика базируется на ряде специфических терминов и понятий, установленных государственными стандартами (ГОСТ 26656-85 [10], ГОСТ 20911-89 [11]) . Ниже приведены данные согласно ГОСТам, ОСТам, СТП, а также взятые в научно-технической и учебной литературе [1]. Выборочно остановимся на основных терминах.

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

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

Диагностирование – процесс определения вида технического состояния объекта, системы.

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

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

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

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

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

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

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

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

Дефект – каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным НТД.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Глава 1. Основы технической диагностики

1.1. Основные направления технической диагностики

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

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

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

При эксплуатации АТ по фактическому техническому состоянию [39] важно обеспечить необходимую эффективность технического обслуживания. Для этой цели служит *ранняя диагностика*, позволяющая обнаружить неисправности АТ с упреждением в такой стадии их развития, которая допускает хоть и ограниченное, но безопасное продолжение эксплуатации. Благодаря раннему обнаружению дефектов и неисправностей техническая

диагностика позволяет устранить отказы в процессе ТО, что повышает надежность и эффективность эксплуатации АТ. Это означает, что диагностика совершенствуясь и развиваясь перерастает в *прогнозирование* состояний АТ, являющееся одним из направлений области технической диагностики. Здесь решения должны основываться на моделях отказов, изучаемых в теории надежности. При прогнозировании очень важен выбор вида модели и ее обоснование, так как прогноз, осуществляемый по разным моделям, дает существенно различные результаты [4]. Следует отметить, что прогнозирование с использованием диагностических моделей может осуществляться не только путем экстраполяции, но и в направлении уменьшения наработки - интерполированием. Такое предсказание прошедшего состояния называется *генезом*. Генез необходим при оценке состояния объекта, предшествовавшего отказу.

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

1.2. Задачи технической диагностики

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

Следует отметить, что угрожающие при своем развитии разрушением объектов АТ неисправности можно укрупнено разделить на три группы [24]:

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

средств диагностики;

2) неисправности, способные развиваться в аварию в течение нескольких минут, а также неисправности, характер и темп развития которых нельзя достоверно предсказать на основе достигнутого уровня знаний. Возникновение подобных неисправностей должно сопровождаться немедленной выдачей сигнала экипажу самолета (или персоналу испытательного стенда) для привлечения внимания, оценки ситуации и принятия необходимых мер;

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

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

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

Опыт эксплуатации АТ для решения задач диагностики показывает, чтобы правильно поставить диагноз, необходимо на первом этапе заранее знать все возможные состояния, исходя из априорных статистических данных и вероятностей проявления ситуаций, а также массив диагностических признаков, реагирующих на эти состояния. Как уже

отмечалось, процесс качественного изменения технических свойств АТ происходит непрерывно, а это значит, что множество возможных ее состояний бесконечно и даже несчетно. Одна из задач диагностики состоит в том, чтобы разбить множество состояний на конечное и небольшое число классов. В каждом классе объединяются состояния, обладающие одинаковыми свойствами, выбранными в качестве признаков классификации. При этом статистическая база параметров, полученных перечисленными выше методами диагностики, должна быть непредвзятой и реальной.

Не все параметры, которые могут быть использованы в диагностике, равноценны по содержательности сведений о функционирующих системах АТ. Одни из них приносят информацию сразу о многих свойствах работающих модулей, другие, напротив, крайне бедны. Безусловно, предпочтение следует отдавать диагностическим параметрам, носящим флуктуирующий характер, а не тем, которые постоянны или меняются очень медленно [4]. Например, шум авиадвигателя и его вибрация по количеству приносимой информации имеют большое преимущество перед такими устойчивыми инертными сигналами, как температура охлаждающей жидкости, скорость вращения вала и др., хотя эти параметры так же как шум и вибрация зависят от состояния работающего авиадвигателя. Поэтому на втором этапе интересным представляется рассмотреть задачи взаимосвязи диагностических параметров, их изменение и возможное влияние друг на друга, а также оценить значимость признаков разных функциональных параметров АТ.

Известно, что теория постановки диагноза довольно хорошо описывается общей теорией связи, являющейся одним из разделов теории управления [5]. На службу диагностике можно поставить математический и логический аппараты, систему освоенных понятий и терминологию. Необходимо лишь найти физическую интерпретацию абстрактных формул и пути практического осуществления предписываемых ими подходов. Таким образом, на третьем этапе необходимо подтвердить, воспользовавшись

известными принципами информационной теории, значимость диагностических признаков, и с учетом этого сформировать диагноз, а в дальнейшем, осуществить прогноз предотказных состояний. Эта часть работы связана с наибольшими трудностями, т.к. функциональные системы АТ являются многопараметрическими, но не все параметры одинаково существенны (информативны) в тех или иных конкретных условиях.

Обратимся к классической трактовке структурирования диагностики по Биргеру И.А. лишь с некоторым дополнением этой схемы (рис.1.1) [4].

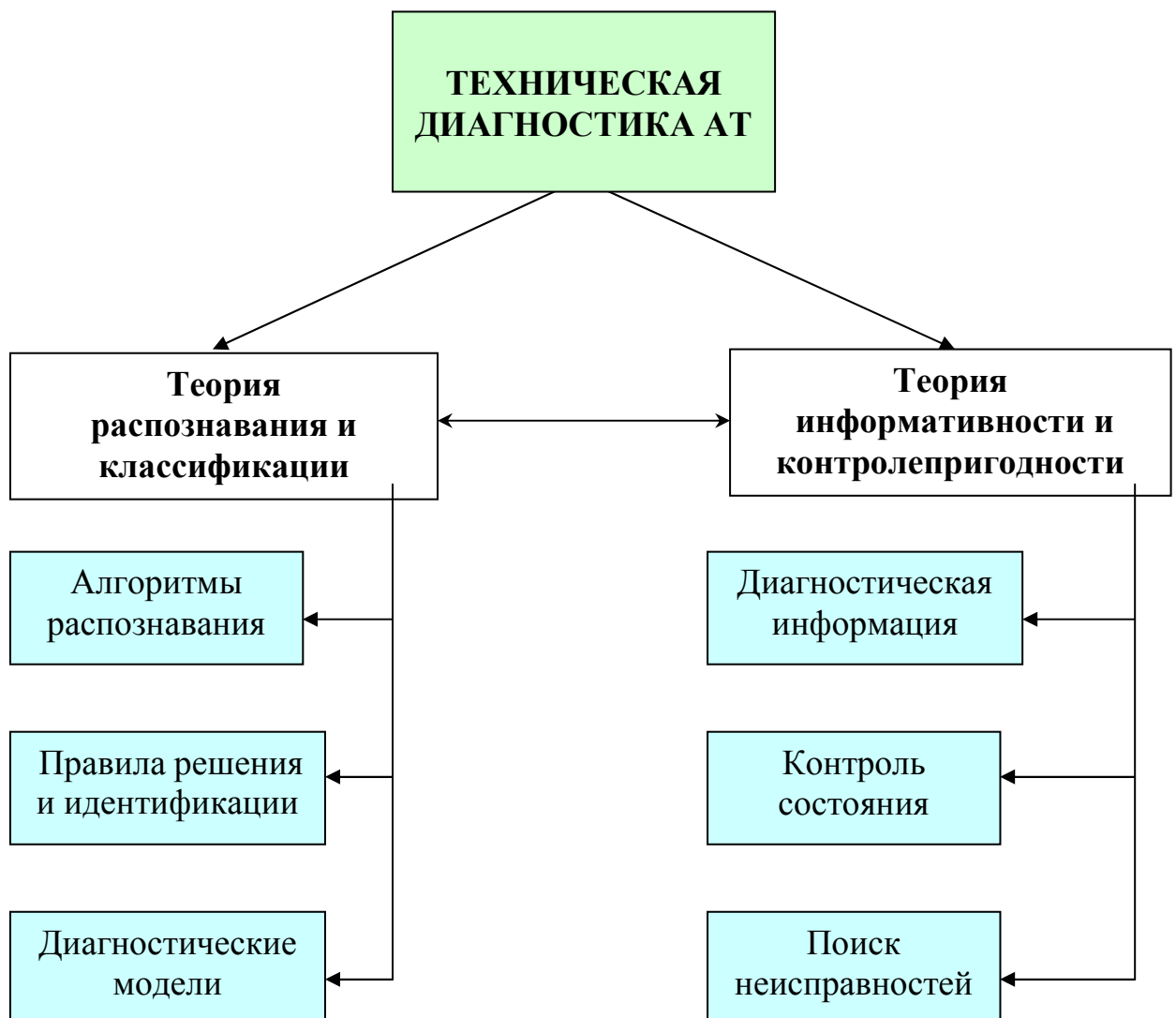


Рис. 1.1 Структура технической диагностики

Представленная укрупненная структура характеризуется двумя взаимосвязанными направлениями: теорией распознавания и теорией информативности. Теория распознавания дополнена новыми элементами классификации и включает в себя разделы, связанные с построением алгоритмов распознавания, решающих правил при идентификации объектов контроля и диагностических моделей и их классификацию. Теория информативности в данном контексте подразумевает получение диагностической информации с помощью известных методов и средств диагностики, автоматизированный контроль с разработкой алгоритмов поиска неисправностей, минимизацию процесса установления диагноза.

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

В последующих главах пособия излагаются теоретические и информационные аспекты методов постановки технического диагноза, рассматриваются методы диагностики авиационной техники с информационных позиций, приводятся конкретные примеры в области информационной диагностики.

Глава 2. Теоретические и информационные аспекты технического диагноза

2.1. Основные философские воззрения теории информации

Рассмотрим, как изменялось понятие «информация» в разные периоды развития диагностики и в разных ее контекстах. Различные исследователи предлагали как разные словесные определения, так и разные количественные меры информации. Анализ истории термина «информация» позволяет глубже понять некоторые современные аспекты и разночтения его употребления. Латинское слово «информация» означает: придание формы, свойств. В XIV веке так называли божественное «программирование» - вложение души и жизни в тело человека [43]. Примерно в это же время слово «информация» стало означать и передачу знаний с помощью книг. Таким образом, смысл этого слова смещался от понятий «вдохновение», «оживление» к понятиям «сообщение», «сюжет».

В настоящее время мы говорим, что получаем информацию (сведения), когда узнаем что-либо о событии, результат которого не был предопределен; и чем более ожидаемым, вероятным является событие, тем меньше информации мы получаем. На таких рациональных представлениях о том, как уменьшается неопределенность при получении тех или иных сведений, и базируются научные концепции информации и количественные (вероятностные) меры ее оценки [15].

Основополагающими работами в этом направлении являются статьи Р. Хартли (1928 г.) [18] для равновероятных событий и К. Шеннона (1948 г.) [44] для совокупностей событий с различными вероятностями. Следует отметить, что еще в 1933 г. появилась работа нашего соотечественника В.А. Котельникова о квантовании электрических сигналов, содержащая знаменитую «теорему отсчетов». Однако в мировой научной литературе считается, что именно 1948 г. – это год зарождения

теории информации и количественного подхода к информационным процессам.

Появление этих работ было обусловлено стремительным развитием технических средств связи и необходимостью измерения “объемов” (количеств) передаваемых сведений. Теория информации возникла в недрах теории связи, как ее аппарат и фундамент. Это отражено уже в названии основополагающего труда К. Шеннона «Математическая теория связи». При этом сам автор был против распространения его подхода на другие научные направления: он писал о специфике задач связи, о трудностях и ограничениях своей теории.

Однако следующие три десятилетия стали периодом широчайшей экспансии теоретико-информационных представлений - развития как собственно теории информации, так и ее разнообразнейших приложений, благодаря которым сформировалась настоящая общенаучная, философско – информационная парадигма. Вовлеченными в этот процесс оказались и “чистые” математики, и специалисты по теории систем, физики, химики, биологи, представители практически всех гуманитарных наук.

Для этого “взрыва” были определенные предпосылки, сформированные развитием физики. Математическое выражение для количества информации, введенное Р.Хартли (2.1) и обобщенное К.Шенноном (2.2-2.3), - «копия» знаменитой формулы Л. Больцмана для физической энтропии системы. Это «совпадение» далеко не случайно - оно свидетельствовало о каких-то глубинных общностных процессах. Потребовалась универсальная мера гетерогенности систем, которая позволила бы сравнивать их сложность и многообразие. В дальнейшем эта мера использовалась как, например, в термодинамике (в моделях идеального газа), так и в диагностике материальных объектов (при анализе работы функциональных систем, распознавании образов, в решении задач постановки диагноза).

Проникновение термодинамических представлений в теоретико-информационные исследования привело к переосмыслению работ классиков

термодинамики и статистической физики. В публикациях рассматриваемого периода [8] упоминаются работы П. Лапласа, Р. Майера, Д. Джоуля, Г. Гельмгольца, С. Карно, Р. Клаузиуса, Дж. Томпсона, Нернста, Дж. Гиббса, Л. Больцмана, Дж. Максвелла, Л. Сцилларда и других физиков.

Представления термодинамики и статистической физики создатели теории информации стремились расширить до ранга общесистемных моделей. Своеобразным этапом в этом процессе стали работы Л. Бриллюэна [19], который на основе введенного им понятия «негэнтропийного принципа» обосновал связь понятия количества информации с понятием физической энтропии. Пользуясь современными терминами, следует отметить, что предметом не только этих первых, но и большинства более поздних теоретико-информационных работ была лишь “микроинформация” - информация, которую система не запоминает и которая является мерой разнообразия возможных микросостояний, определяющих макросостояние системы.

Развитие теоретических термодинамических представлений привело, в частности, к выводам о возможности построения статистической как равновесной, так и неравновесной термодинамики на базе теории информации, а впоследствии - и к построению (в том числе и на базе экспериментов) термодинамической теории информационных процессов, в которой установлены связи между информационными и энергетическими характеристиками [42].

Существует и другой подход к понятию информации, охватывающий структуры и связи систем. В 1936 году А. Тьюринг и Э. Пост независимо друг от друга разработали концепцию “абстрактной вычислительной машины”. Затем А. Тьюринг описал гипотетический универсальный преобразователь дискретной информации (“машину Тьюринга”).

Начало пониманию сущности информации как всеобщего свойства материи было положено Н. Винером. В 1941 году он опубликовал свой первый труд об аналогиях между работой математической машины и

нервной системы живого организма, а в 1948 году - фундаментальное исследование “Кибернетика, или управление и связь в животном и машине” [8]. По замыслу автора эта монография должна была стать наукой об управлении, объединяющей все виды управления в живой и неживой природе. Недаром Н. Винер использовал для названия новой науки термин, предложенный еще Ампером в его классификации наук. Ампер, как известно, предлагал назвать кибернетикой науку об управлении государством.

Предложенная формула информации **«Информация — это информация, а не материя или энергия»**, зафиксированная как открытие в Международной регистрационной палате информационно-интеллектуальной новизны, интерпретируется следующим образом: «Информация представляет собой всеобщее свойство взаимодействия материального мира, определяющее направленность движения энергии и вещества. Это всеобщее, нематериальное свойство взаимодействия материального мира включает в себя первичную и вторичную информацию. При этом, под первичной информацией подразумевается направленность движения вещества, при котором возникает не только направленность его движения в пространстве, но и форма (структура, морфология) как результат направленности движения, составляющих вещество элементов, а вторичная информация есть отражение первичной в виде формы (структуры, модуляции) пространственных сил, сопровождающих всякое движение вещества. Открытие может быть использовано для изучения процессов и явлений, не имеющих в настоящее время научного обоснования, в физике, химии, биологии, медицине, экономике и других областях человеческих знаний» [30].

Из этого следует, что информация объединяет в себе три принципиально отличные вида — направленность движения, форму (структуру) вещества и форму (структуру, модуляцию) окружающих вещество полей, которые мы наблюдаем в результате действия пространственных сил, сопровождающих движение вещества. Однако

Н. Винер не смог объяснить взаимосвязь механизма информационного взаимодействия и механизма управления.

На необходимость двух принципиально различных подходов к построению теории информации указывал Дж. Нейман, отмечавший, что вероятностно-статистический подход необходим для информационного описания двух разных процессов (систем) – статистических и динамических.

Понятие информации не случайно оказалось ключевым для быстро развивающихся дисциплин – как общенаучных, так и специальных. Это было вызвано бурными успехами экспериментально-аналитических исследований более полвека назад, в 1948 г., когда были созданы концепции и основы математического аппарата общей теории информации для анализа состояний систем.

Большое значение для понимания сущности информации имели работы английского ученого У. Эшби, однако, и они не смогли сдержать превращения кибернетики как науки об управлении, в науку об обработке информации с помощью вычислительной техники. Мешала математика: предложенная Н. Винером и К. Шенноном формула для измерения информации «заслонила» от ученых физику информации, о которой говорили Н. Винер и У. Эшби. Более того, вмешательство в выяснение сущности информации таких известных физиков, как Э. Шредингера и Л. Бриллюэна, только усугубило проблему: информации стали противопоставлять энтропию энергии, т.к. математическое выражение для измерения количества информации Винера-Шеннона по форме совпадало с математическим выражением энтропии энергии Больцмана-Планка.

Считалось, что «настоящую информацию» измерить нельзя, т.к. до конца оставалось неясно, что же такое настоящая информация.

В теории связи по К.Шеннону информация выступает в виде различных сообщений: например, букв или цифр, как в телеграфии, или непрерывной функции времени, как при телефонии или радиовещании, но в любом из указанных примеров это представляет собой передачу смыслового

содержания человеческой речи. В свою очередь человеческая речь может быть представлена в звуковых колебаниях или в письменном изложении. На это удивительное свойство информации – представлять одно и то же смысловое содержание в самом различном физическом виде – обратил внимание исследователей У. Эшби. Это свойство вторичной информации называется *кодированием*. Для того чтобы общаться с другими людьми, человеку приходится постоянно заниматься кодированием, перекодированием и декодированием. Понятно, что по каналам связи вторичная информация может передаваться в самых различных системах кодирования. Одной из задач, которую ставил перед собой К. Шеннон, заключалась в том, чтобы определить систему кодирования, позволяющую оптимизировать скорость и достоверность передачи вторичной информации.

Для решения этой задачи К. Шеннон использовал математический аппарат, созданный еще в 1928 году Р. Хартли в его работе «Передача информации». Именно Р. Хартли ввел в теорию передачи информации методологию "измерения количества информации", которая представляет собой «группу физических символов – слов, точек, тире и т.п., имеющих по общему соглашению известный смысл для корреспондирующих сторон» [47].

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

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

$$H = \log_2 2 = 1 \text{ бит (1 двоичная ед.)}. \quad (2.1)$$

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

Шеннон К., используя методологию Р. Хартли, обратил внимание на то, что при передаче словесных сообщений частота использования различных букв алфавита не одинакова: некоторые буквы используются очень часто, другие - редко. Существует и определенная корреляция в буквенных последовательностях, когда за появлением одной из букв с большой вероятностью следует конкретная другая. Введя в формулу Р. Хартли указанные вероятностные значения p , К. Шеннон получил новые выражения для определения количества информации. Для одного символа это выражение приобретает вид:

$$H = -p \log_2 p, \quad (2.2)$$

а сообщения, состоящего из "n" символов:

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i. \quad (2.3)$$

Выражение (2.3), повторяющее по форме выражение для энтропии в статистической механике, К. Шеннон по аналогии назвал *энтропией*.

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

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

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

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

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

Следует отметить, что важную роль в развитии теории информации сыграли математические исследования - работы А.Н. Колмогорова, М.М. Бонгарда [5], которые привели к новым определениям в теории информации. Количество информации рассматривалось как минимальная длина программы (сложность), позволяющая однозначно преобразовывать одно множество в другое. Эти подходы позволили весьма расширить круг

конкретных задач, в частности, вовлечь во многие исследования мощь электронно-вычислительной техники.

Технические системы сразу же стали очень перспективными объектами для диагностики. С одной стороны, это – физические, материальные объекты, доступные разным методам экспериментальных исследований. С другой стороны, информационный обмен является важнейшей характеристикой поведения этого объекта. Наличие информационного обмена, общего для любых технических объектов (систем), позволяет осуществить их диагностику на основе теории информации, т.е. использовать ее для обеспечения процессов распознавания состояний АТ.

2.2. Основные информационные законы

Общая теория информации формулирует четыре важнейших информационных закона, которые определяют информационную сторону взаимодействия материи и субъекта (рис. 2.1).

2.2.1. Закон сохранения информации

«Информация сохраняет свое значение в неизменном виде пока остается в неизменном виде носитель информации – материальный объект» [19]. Закон сохранения информации - это, прежде всего, проявление одного из важнейших свойств информации - независимость информации от времени. Будучи нематериальной стороной материи, информация не может существовать сама по себе без материальной стороны. Однако имеет место распределение первичной и вторичной информации по шкале времени. Вторичная информация, как правило, преобладает с увеличением возраста объекта, но при этом сохраняется неизменность суммарной информации.

Это свойство обеспечивается под воздействием специальных физических сил. Физические силы - это основа современной физической науки. Именно с изучения сил и началось становление физики как науки. Основоположник физической науки И. Ньютон высказался по этому вопросу

совершенно определенно, считая что вся трудность физики, как будет видно, состоит в том, чтобы по явлениям движения распознать силы природы, а затем по этим силам объяснить остальные явления.

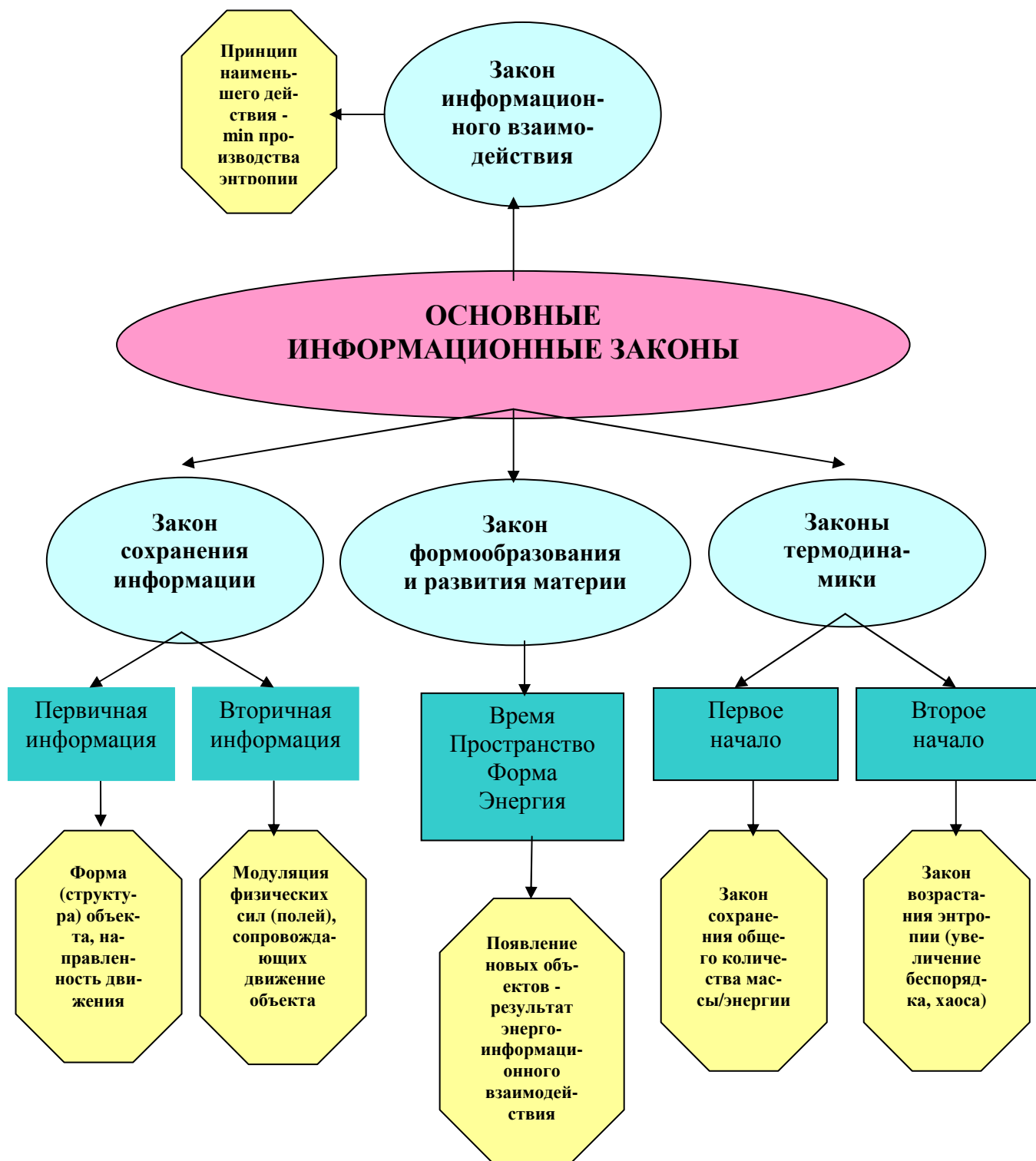


Рис.2.1. Основные информационные законы

Все законы сохранения энергии и действующие в них силы жестко связаны с информационной стороной движения, но приоритет всегда отдавался энергетическому проявлению сил, а потому затенялось главное - указанные силы действуют в интересах сохранения информации.

Интересно отметить, что еще в XVII в. Лейбниц назвал математическое выражение для измерения количества движения, сформулированное Ньютоном ($p = mV$), «законом сохранения направления», или «законом сохранения движения вперед». То же самое можно сказать и о силе инерции: сила инерции сохраняет направленность равномерного и прямолинейного движения вещественных тел. Причем сохраняет не только скорость, но, прежде всего, направленность движения. Сила инерции - это сила сохранения информации.

В физике существует большое количество сил сохранения информации. Одни сохраняют плоскость кругового движения, другие направленность оси гироскопа, третьи форму и структуру вещественных тел, но все они рассматриваются разрозненно, без понимания их общего предназначения и механизма действия. Рассмотрение действия различных сил – традиционная область научных интересов современной физики и те трудности, которые эта область испытывает сегодня, объясняются, прежде всего, непониманием информационной стороны действия этих сил, и незнанием информационных законов.

Закон сохранения информации – это многогранный и сложный закон, теория которого находится на стадии формирования. Но уже сегодня можно с уверенностью сказать: «Любая информация, во всех ее формах и структурах имеет силы сохранения, оберегающие ее существование» [5].

2.2.2. Основной информационный закон формообразования и развития материи

Этот закон логически вытекает из сущности информационного дуализма [18]. Появление любых новых материальных форм есть всегда

результат энергоинформационного взаимодействия, но сама новая форма (структура) материи определяется только информационной стороной этого взаимодействия.

Выше показано, что любому человеческому труду предшествует создание вторичной информации, которая тоже создается на основании информации – человеческих знаний. Но в процессе самого труда в формообразовании участвует и контактное взаимодействие различных видов первичной информации.

Когда на прессе штампуется изделие определенной формы, то все понимают, что форма эта зависит не от мощности прессы, а от формы штампа. Конечно, получение формы под давлением во многом определяется твердостью, пластичностью используемого материала, его способностью сохранять заданную форму. Но это свойства не формы, а носителя этой формы, определяющие у него наличие «памяти» и параметров этой памяти. Носитель всегда материален и его материальные свойства определяют свойства памяти, но не информации. Сама же форма - не материальна.

Общая теория информации показывает, что информация не зависит от времени, но характеризуется пространством. Энергия не зависит от пространства, но характеризуется временем [42].

Например, любое физическое колебание - механическое или электромагнитное - имеет две независимые, но совместно действующие стороны: энергетическую, связанную со скоростью движения материи, которая характеризуется временем, и информационную, связанную с пространственным действием колебаний, пространственным размахом. Скорость движения механического маятника, как известно, при одинаковом периоде колебаний может быть различна и определяется энергией. А период колебаний этого маятника, как определил Ньютон, зависит только от его длины.

2.2.3. Основной закон термодинамики в информационной трактовке

Одним из важнейших принципов, вытекающих из второго начала термодинамики, является принцип деградации энергии. При этом энергия подразделяется на энергию высокого качества - механическую и электрическую, среднего качества – химическую, и низкого качества - тепловую энергию. Такая классификация определяет способность энергии производить работу, а это означает, что тепловая энергия по сравнению с остальными дает самый низкий коэффициент полезного действия.

Энергия механической системы имеет самый высокий КПД именно потому, что в механической системе все молекулы жестко связаны и в процессе выполнения работы движутся однонаправлено.

Все это означает, что для выполнения работы энергетические возможности должны сопровождаться возможностями информационными и всякий процесс совершения работы есть процесс информационного взаимодействия, в котором информация выступает в виде свойства, управляющего направленностью движения.

Новое толкование второго начала термодинамики позволяет определить ее связь с классической механикой, которая казалось утерянной из-за отсутствия в термодинамике понятия траектории: всякий процесс совершения работы есть процесс информационного взаимодействия, в котором информация выступает в виде направленности движения, выполняя управляющую роль.

Информационная трактовка второго начала утверждает, что в замкнутой системе любое однонаправленное коллективное движение составляющих эту систему элементов не может продолжаться сколь угодно долго и должно перейти в хаотическое движение.

Но поскольку сама информация не зависит от времени, то целесообразно подчеркнуть, что второе начало в общей теории информации связано с материальным свойством нематериальной информации, с

носителем информации, с тем свойством, которое называется образом (видом).

Второе начало термодинамики - это всеобщий закон природы, который распространяется на любую физическую систему, в том числе и на стационарные формы существования материи. Ведь стационарная форма существования материи - это результат информационного взаимодействия.

Направленное движение материальной точки, единичного объекта - это простейший вид существования информации, но он является основой возникновения любой другой формы материального мира.

2.2.4. Принцип минимума диссипации

«При информационном взаимодействии направленность движения обеспечивает минимум диссипации энергии» [50].

Еще в XVIII в. П. Мопертюи сформулировал принцип, который называется сегодня принципом наименьшего действия Мопертюи-Лагранжа. Мопертюи П. сформулировал, что природа, производя действия, всегда пользуется наиболее простыми средствами, и количество действия всегда является наименьшим. Правда, П. Мопертюи не смог объяснить правильно, что же такое «действие природы», и полагал, что справедливость этого принципа следует из разума Бога.

В термодинамике сформулирован принцип наименьшего рассеяния энергии [38]. Этот принцип обоснован в теореме американского физика Л. Онсагера - одной из основных теорем термодинамики неравновесных процессов.

На основании теоремы Л. Онсагера бельгийским физиком И. Р. Пригожиным в 1947 г. доказана еще одна теорема термодинамики неравновесных процессов, названная теоремой И. Пригожина, согласно которой при данных внешних условиях, препятствующих достижению системой равновесного состояния, стационарному состоянию системы соответствует минимум производства энтропии.

Сама сущность проводимых в этой области изысканий: формирование потока и движение потока, перемещение материальной точки в потенциальном поле, действие сил, определяющих направленное движение, - все это говорит о том, что следует рассматривать именно информационную сторону взаимодействия материи. Именно информация управляет и направленностью движения вещества и направленностью движения энергии.

Общая теория информации утверждает [42], что существует информационная сторона взаимодействия материи, определяющая направленность движения, и естественным критерием выбора направленности движения является минимум диссипации энергии.

Используемое понятие минимума диссипации энергии выходит за рамки сегодняшнего понимания в физике, более того, энергетическая сторона энергоинформационного взаимодействия материи с учетом управляющего информационного воздействия требует серьезного физического уточнения, но это уже выходит за рамки общей теории информации. Принцип минимума диссипации энергии – универсальный закон информационного взаимодействия, объясняемый только с позиций общей теории информации [8].

2.3. Энтропия и диагностическая информация

2.3.1. Энтропия Больцмана-Гиббса-Шеннона в решении прикладных задач

В статистической теории открытых систем [19] энтропия является одной из важнейших характеристик и может играть три разных роли: служить мерой неопределенности при статистическом описании; мерой относительной степени упорядоченности неравновесных состояний открытых систем; мерой разнообразия в информационном потоке.

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

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

$$S_b = -k \cdot n \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,t) \cdot \ln f(x,t) dx + S_0. \quad (2.4)$$

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

Рассмотрим n -мерное фазовое пространство $x=(r_1, \dots, r_n; p_1, \dots, p_n)$. Введем функцию распределения в n -мерном фазовом пространстве $f_n(x,t)$. Через эту функцию выражается энтропия Гиббса:

$$S_g = -k \int_{-\infty}^{+\infty} f_n(x,t) \cdot \ln f_n(x,t) dx + S_0. \quad (2.5)$$

Константу S_0 можно выбрать таким образом, чтобы в отсутствии корреляций, когда распределение $f_n(x,t)$ выражается через произведения распределений отдельных частиц, энтропии Больцмана и Гиббса совпадали: $S_b=S_g$. Естественно, что выражение (2.4) является общим, чем выражение (2.5), так как оно справедливо и при наличии корреляций координат и импульсов частиц. При учете корреляций равенство $S_b=S_g$ нарушается и заменяется неравенством $S_b \leq S_g$.

Энтропии Больцмана и Гиббса были введены при статистическом описании систем частиц, когда микроскопическое состояние характеризуется набором пар сопряженных координат и импульсов частиц системы [49]. Определение энтропии через средние значения функции распределения энтропии более значимо, так как выражения такого типа обладают совокупностью свойств, которые позволяют использовать их в качестве меры не-

определенности при статистическом описании. На это и обратил внимание К.Шеннон.

Это дает основание использовать более общее определение энтропии – энтропию Шеннона:

$$S = - \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,t) \cdot \ln f(x,t) dx + S_0, \quad (2.6)$$

где $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x,t) dx = 1$.

Здесь $f(x,t)$ - функция распределения произвольного набора переменных x , характеризующих состояние рассматриваемой системы. Определенная таким образом энтропия, может служить мерой неопределенности при любом распределении (2.3).

Если состояние системы характеризуется дискретным набором переменных n с функцией распределения f_n , то энтропия определяется выражением:

$$S = - \sum_{n=1}^m f_n \cdot \ln f_n . \quad (2.7)$$

Свойства энтропии, позволяющие принять ее за меру неопределенности при статистическом описании, приводятся в курсах теории информации [7,42] и некоторых курсах статистической физики Ландау Л.Д., Лифшица Е.М., Леонтовича М.А. и др.

2.3.2. Применение Н-теоремы для открытых систем

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

$$L_F = F(t) - F_0 = kT \int_{-\infty}^{+\infty} f(v, t) \cdot \ln(f / f_0) dv \geq 0, \quad (2.8)$$

которое представляет пример т.н. энтропии Кульбака.

2.3.3. Динамическое и статическое описание сложных движений

Ранее отмечалось, сколь драматическим было "соперничество" динамической и статистической теорий при описании сложных движений в открытых макроскопических системах.

Сложные движения в динамике первоначально были обнаружены в гамильтоновых системах. Для их характеристики и было введено понятие "динамический хаос". В настоящее время этот термин широко используется и для сложных движений в диссипативных динамических системах. Основной особенностью динамического хаоса является динамическая неустойчивость движения - экспоненциальная расходимость близких в начальный момент времени траекторий, вследствие чего имеется высокая чувствительность к изменению начальных условий. Мерой экспоненциальной расходимости служит К-энтропия (энтропия Крылова-Колмогорова-Синяя) [7]. К-энтропия связана со средней скоростью расхождения близких в начальный момент траекторий и, следовательно, с показателями Ляпунова. К-энтропия выражается через положительные показатели Ляпунова по формуле

$$K = \sum_i \lambda_i (\lambda_i > 0) . \quad (2.9)$$

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

2.4. Оценка значимости и ценности информации в практических задачах диагностики

В теоретико-информационных исследованиях [42, 43, 44] можно выделить два подхода к определению понятия ценной (полезной) информации, т.е. информации, которая помогает достижению цели. Если вероятность достижения цели велика, то ценность информации определяется по критерию минимизации затрат на ее получение. Если же достижение цели маловероятно, то мерой ценности (полезности) информации может служить некая функция отношения вероятности достижения цели после и до получения информации [7].

Информация, получаемая системой контроля B об объекте A , характеризует его состояние. Следовательно, если поставить целью диагностирования получение информации о времени возможного отказа объекта, то полученный информационный критерий может представлять собой обобщенный показатель остаточной работоспособности объекта. При этом важной задачей является выбор наиболее существенных диагностических параметров. Он может быть также осуществлен с помощью информационных оценок (рис.2.2). Известно, что определенные симптомы и их комбинации адекватно характеризуют техническое состояние объекта диагностирования. Таким образом, рассматривают две зависимые системы: технических состояний объекта и симптомов этих состояний (диагностических признаков).

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

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

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

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

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

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

$$JA(B) = H(A) - H(A/B), \quad (2.10)$$

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

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

В общем случае признак B_j m -го разряда имеет m возможных альтернативных значений $B_{1j}, B_{2j}, \dots, B_{mj}$. В инженерной практике обычно пользуются обследованием по двум, трехразрядным признакам, т.е. признакам, имеющим два-три возможных состояния. Обычно представляют признак 3-го разряда в виде комплекса простых альтернативных признаков. Если выявлено, что признак B имеет для данного состояния объекта значение B_{js} , то это значение называют реализацией признака B_j . В качестве диагностического веса реализации B_j для состояния A_i по аналогии с (3.14) принимают величину

$$Z_{Ai}(B_{js}) = \log \left[\frac{P(B_{js}/A_i)}{P(B_{js})} \right], \quad (2.11)$$

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

Величину $Z_{Ai}(B_{js})$ называют *диагностическим весом реализации*. Ее считают также показателем ценности информации и информационной мерой признака. По формуле (2.11) рассчитывают диагностический вес реализаций двухразрядных параметров по двум возможным состояниям. Диагностической ценностью обследования по признаку B_j для состояния A_i считают величину информации, внесенную признаком B_j для определения состояния A_i . Для m - разрядного признака

$$Z_{Ai}(B_j) = \sum_{s=1}^m P(B_{js}/A_i) \cdot Z_{Ai}(B_{js}) . \quad (2.12)$$

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

$$Z_{Ai}(B_j) = 2 \cdot P(B_j/A_i) \cdot \log \left[\frac{P(B_j/A_i)}{P(B_j)} \right] . \quad (2.13)$$

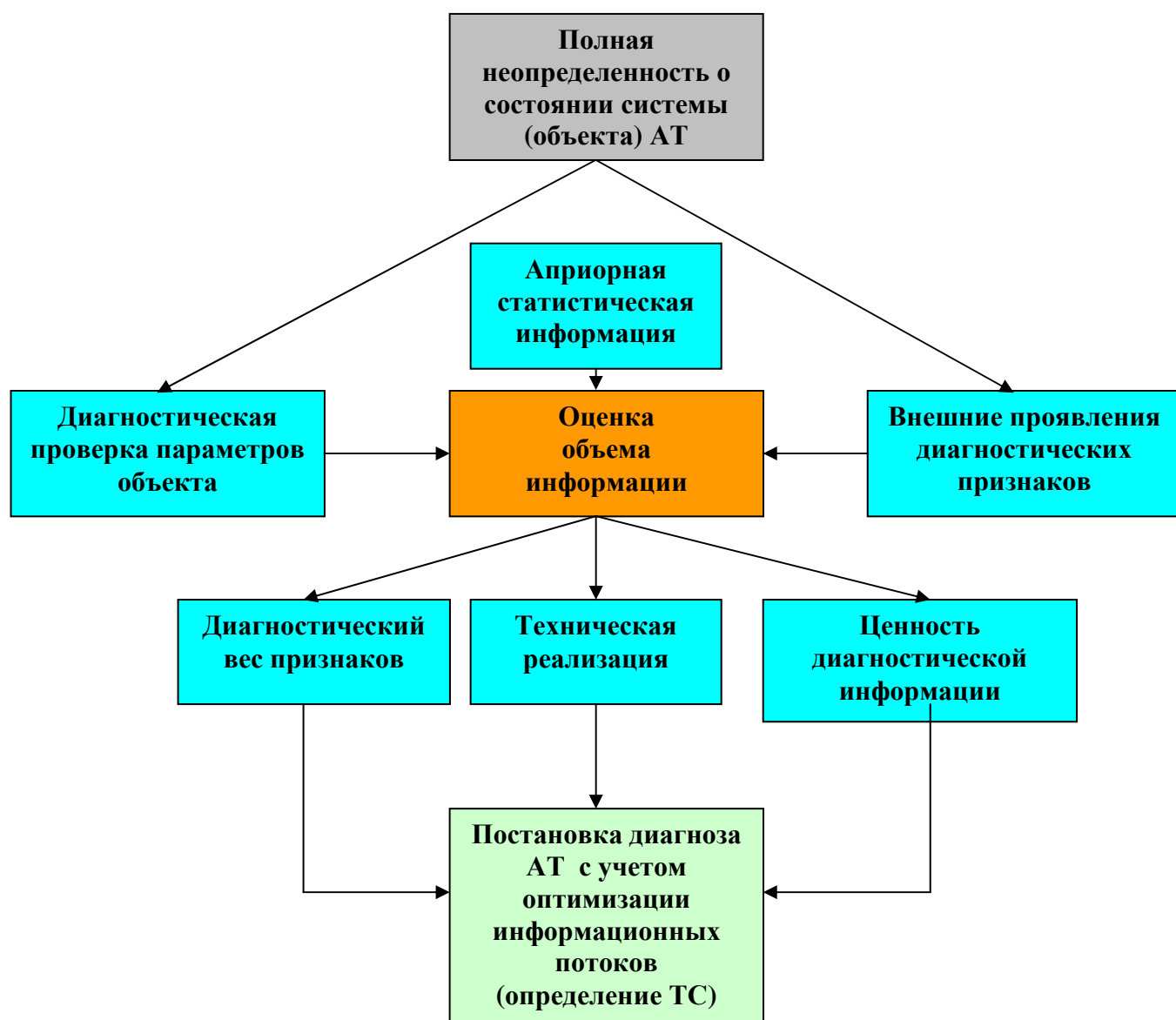


Рис.2.2. Информационная оценка процессов диагностирования АТ

Реализации одного и того же диагностического признака в общем случае не равнозначны по их вкладу в информацию о различных состояниях объекта. Диагностическая ценность обследования учитывает все возможные реализации признака и представляет собой математическое ожидание величины информации, вносимой отдельными реализациями. По формуле (2.13) определяют диагностическую ценность обследований для выбранных состояний. Диагностическая ценность обследований B_j для какого-либо одного состояния не показывает истинной общей диагностической ценности признака B_j для всего объекта. Обследование, обладающее небольшой ценностью для одного состояния, может иметь значительную ценность для другого. Поэтому вводят понятие общей диагностической ценности обследования по признаку B_j для всей диагностируемой совокупности состояний

$$Z_A(J_{B_j}) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot Z_{A_i}(B_j). \quad (2.14)$$

Величина $Z_A(J_{B_j})$ представляет собой ожидаемое (среднее) значение информации, которое может быть внесено обследованием в различные, заранее неизвестные диагнозы. Она может быть использована не только для оценки эффективности обследования, но и для целесообразности выбора величины диагностических интервалов (числа разрядов). Для определения общей диагностической ценности обследования используют формулу (2.14). При определении комбинации признаков, с помощью которых выбранная их

совокупность была бы отнесена к одному из возможных состояний объекта, составляется алгоритм на основе формулы Байеса

$$P(A_i/B) = \frac{P(A_i) \cdot P(B/A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_s) \cdot P(B/A_s)}, \quad (2.15)$$

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

Таким образом, устанавливается связь между определенным набором диагностических признаков и соответствующим этому набору состоянием объекта (рис.2.2). Состояние объекта может определяться количеством информации, получаемой системой контроля в зависимости от смыслового назначения этой информации. Существенность параметров контроля также определяется по количеству информации, которое можно получить с их помощью. Ценность обследования определяется мерой вероятности данного состояния, а не вероятностью отказа, по контролируруемому параметру.

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

2.5. Применение информационной энтропии К.Шеннона

в задачах распознавания. Выбор критериев информативности

Из рассмотренных выше положений, научных подходов в теорию информации, а также видов энтропии, характеризующей основополагающее свойство неопределенности сложных систем, можно выделить три группы энтропии и отнести их к следующим категориям (табл.2.1): *термодинамическая, статистическая и информационная энтропии.*

Как уже упоминалось выше, Дж. Нейман отметил, что для информационного описания двух разных процессов – статистических и динамических - необходимо два принципиально разных подхода. Однако в реальном мире, а не в мире моделей, строго разграничить эти два типа процессов невозможно, это разные способы описания одних и тех же физических объектов. Более четко этот дуализм был сформулирован еще А.Розенблютом и Н.Винером учеными, предложившими различать

Таблица 2.1.

Сравнительные характеристики различных энтропий

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

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

функциональное и поведенческое описание открытой системы, взаимодействующей с внешним миром. При функциональном подходе изучают внутреннее устройство системы и выясняют, какие функции выполняют те или иные ее подсистемы, а при поведенческом - способы ее взаимодействия с внешним миром, закономерности ее реакций на те или иные внешние воздействия (тесты) [44].

“Классическая” шенноновская теория информации позволяет измерять информацию текстов и сообщений, исследовать и разрабатывать приемы ее кодирования в передатчике и декодирования в приемнике, измерять пропускную способность канала связи между ними, вычислять уровень шума в канале и минимизировать его воздействия. Развитие теории информации обусловлено представлениями о различных системах как об ориентированных графах - блок-схемах, состоящих из элементов, соединенных между собой устойчивыми связями; термодинамическая информация рассматривалась как «наполнитель» этих блок-элементов. Полагали, что информация как универсальная мера сложности и гетерогенности любых систем, анализ кодов, каналов связи и шумов станут компонентами будущей общенаучной методологии.

Таблица 2.2.

Выбор критериев информативности

Информационный критерий	Расчетная формула (символ)
1. Диагностический признак	

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

Как упоминалось, в теории связи используются два определения К. Шеннона понятия «информация». Одно из них совпадает с энтропией Больцмана и является фактически мерой неопределенности системы при статистическом описании. Второе выражается через разность значений безусловной и условной энтропии. Конкретизация второго определения позволяет ввести меру информации для систем АТ в зависимости от значений управляющих параметров. Здесь для оценки информативности конкретного, проявляющегося диагностического признака необходимо произвести выбор информационного критерия с учетом изменения энтропии рассматриваемой системы (табл.2.2).

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

она становится единственной и универсальной мерой количества информации.

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

Контрольные вопросы ко 2-й главе

1. Какова роль теории информации в процессе диагностирования авиационной техники?
2. Раскройте сущность информационных законов с т.з. энтропийных понятий, применительно к эксплуатации авиационной техники.
3. Выявите роли и различия S – информации (видов энтропий), как во временном процессе, так и при стационарном состоянии в пространстве управляющих параметров.
4. Как определить техническое состояние АТ (поставить диагноз), оптимизируя информационные потоки?
5. Дайте информационную оценку любого предотказного состояния АТ.
6. В чем смысл диагностической ценности обследования? Что понимается под ценностью диагностической информации? Перечислите категории ценности диагностической информации.
7. Какими критериями информативности необходимо воспользоваться для решения диагностических задач?

Глава 3. Методы диагностики авиационной техники с позиций информативности

3.1. Методы диагностики АТ и их возможности

В процессе диагностирования авиационной техники при ее эксплуатации по состоянию можно выделить три основных этапа (рис.3.1.). Первый из них - оперативная диагностика, задача которой заключается в определении, можно ли продолжать нормальную эксплуатацию данного объекта АТ («система исправна») или этот объект должен быть подвергнут до очередного полета каким-либо процедурам обслуживания («система не исправна»).

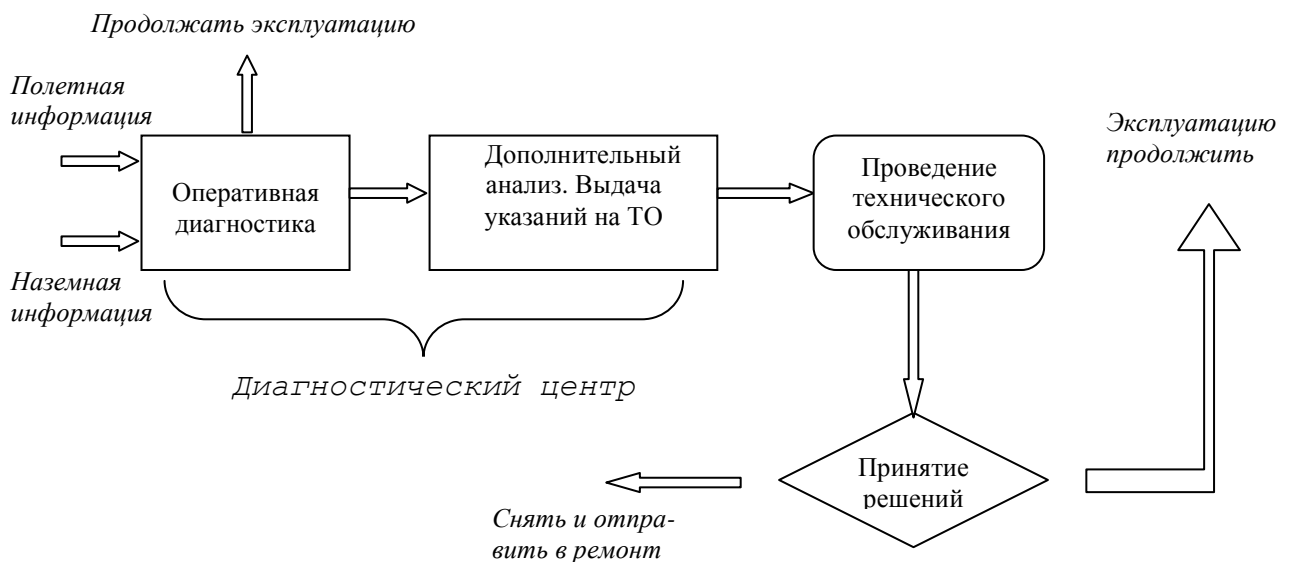


Рис.3.1. Общая схема эксплуатационной диагностики

Такая задача в том или ином объеме для всех наблюдаемых объектов АТ должна решаться, как правило, в конце каждого полетного дня, «на завтра». Оперативность достигается надлежащей организацией потока информации и применением компьютерной техники для ее обработки.

Второй этап - дополнительный диагностический анализ, результатом которого является перечень процедур обслуживания элементов и систем АТ, признанных неисправными, без снятия их с самолета («на крыле»).

Третий этап — выполнение указанных процедур обслуживания, после чего принимается решение о дальнейшей эксплуатации объекта АТ или снятии его с самолета и направлении в ремонт.

В настоящее время широко распространены и значительно развиты методы и средства диагностики, основанные на различных физических принципах, позволяющие охватить контролем наиболее ответственные узлы, агрегаты и системы. В качестве примера остановимся на методах диагностики авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) (рис.3.2.), являющихся наиболее ответственными объектами АТ. Условно их можно разделить на методы прямых измерений структурных диагностических параметров, определяющих техническое состояние ГТД, и методы безразборной (оперативной) диагностики по косвенным параметрам. В качестве косвенных используют диагностические параметры, содержащие информацию об изменении структурных характеристик состояния двигателя. Эти методы [23] позволяют получить достаточно точные результаты оценки, например, износа отдельных элементов. Однако их применение затруднено низкой технологичностью ГТД и в большинстве случаев вызывает необходимость разборки двигателя. Это снижает достоверность контроля, поскольку состояние любого технического объекта после разборки не адекватно его состоянию до этих процедур. Необходимо отметить также, что в процессе эксплуатации разборка ГТД в большинстве случаев не представляется возможной.

Методы оперативной диагностики по косвенным параметрам лишены перечисленных недостатков, хотя в настоящее время они не всегда позволяют локализовать место дефекта. Использование методов измерений структурных характеристик может оказаться необходимым в случае невозможности применения методов оперативной диагностики или для уточнения результатов контроля.

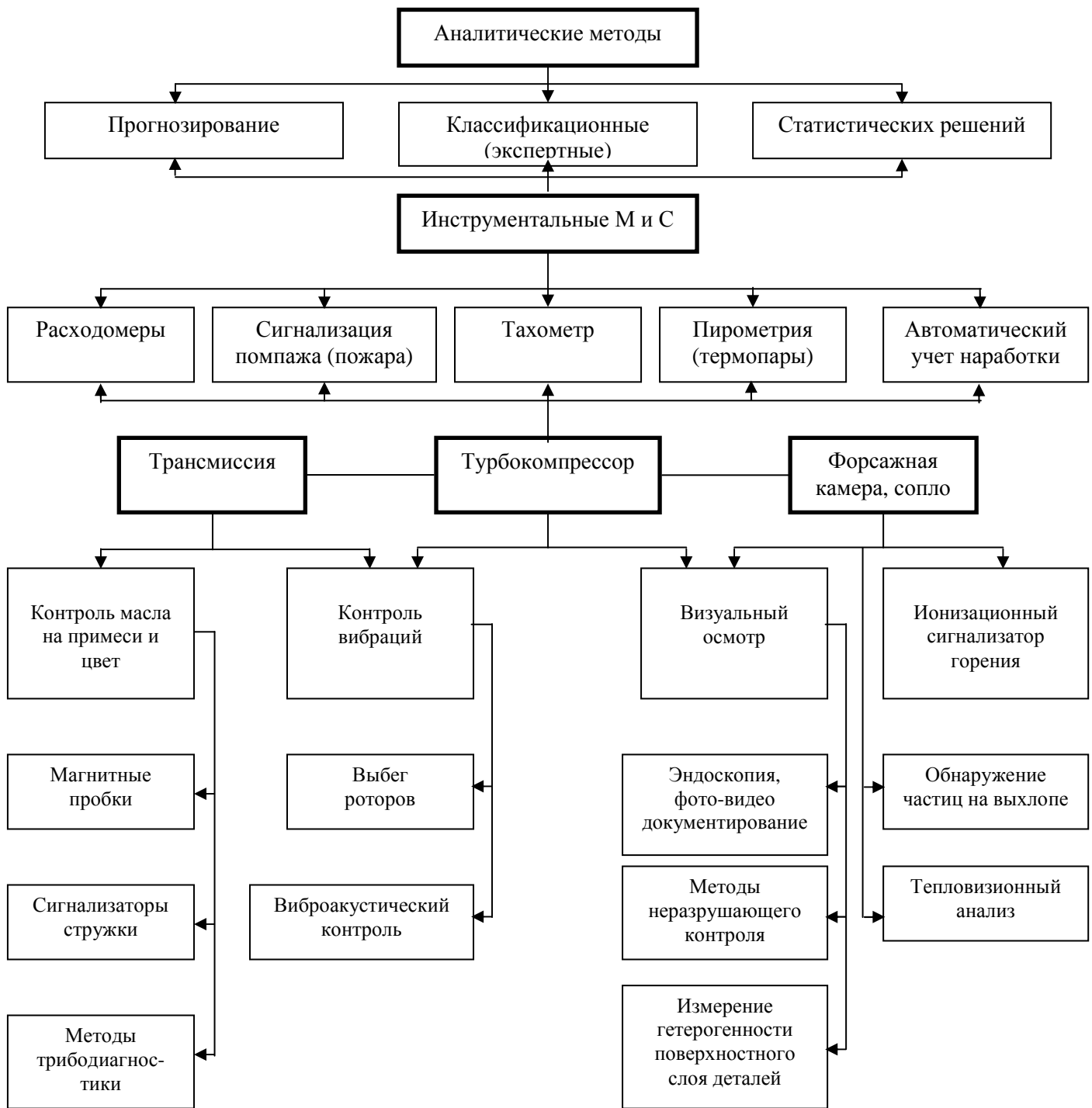


Рис.3.2. Методы и средства диагностики ГТД

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

- диагностику по результатам анализа термогазодинамических параметров;
- диагностику по тепловым параметрам;

- по виброакустическим параметрам;
- трибодиагностику;
- оптико-визуальную диагностику;
- анализ продуктов сгорания;
- измерение выбега ротора.

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

Диагностика неисправностей по тепловым параметрам предусматривает получение информации как от термодатчиков (термопреобразователей), так и от фотоэлектрических пирометров и тепловизоров, в последнее время успешно внедряемых в диагностической практике.

Контроль виброакустических параметров предполагает применение различных типов вибропреобразователей и сигнальной аппаратуры. Разрабатываются методы оценки напряженности конструктивных элементов с помощью голографических установок (создание т.н. «вибропортретов») [21].

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

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

Итак, для диагностики АТ целесообразно использовать параметры, обладающие максимальной информативностью, дополняющие и уточняющие друг друга. Таким образом, задача оценки информационного потенциала параметров, используемых для целей диагностики АТ, является на сегодняшний день очень актуальной.

3.2. Анализ методов технической диагностики АТ с позиций информативности

Сравнительный анализ информативности методов диагностики АТ, представленный ниже, основан на общепризнанном подходе, выдвинутом М.Бонгардом о величине функции вероятности приближения к цели («адресу» дефекта) при регистрации значений параметра [5]. Правда, каких-либо количественных характеристик упомянутой функции в этой главе пособия не приводится. Эта взаимосвязь (информативность – метод) подтверждена практикой эксплуатации, где косвенным критерием информативности служит безошибочность диагноза при проявлении признака, регистрируемого данным методом.

3.2.1. Тепловые методы и их эффективность

Одними из наиболее информативных методов оценки состояния АТ являются методы контроля тепловых параметров [9]. В настоящее время их использование в полете ограничивается контролем температуры в различных точках, например проточной части двигателя, и сравнением ее с допустимыми значениями. Большое развитие тепловые методы нашли при стендовых испытаниях ГТД. Основным достоинством их является возможность получения информации без существенной разборки авиадвигателя. При термометрировании рабочих лопаток турбины на них устанавливают термопары и общий токосъемник. Это влечет за собой неудобства для формирования диагноза вследствие ограниченного количества точек контроля.

Методы бесконтактного термометрирования обладают некоторыми преимуществами [33]. Объектами бесконтактной термометрической диагностики могут являться как двигатель в целом, так и отдельные его агрегаты и детали. Система контроля преобразует инфракрасное изображение в видимое так, чтобы распределение видимой яркости было пропорционально инфракрасной яркости объекта, т.е. пространственному распределению температуры $T(y,z)$ или коэффициента излучения $\epsilon(y,z)$. Это преобразование обычно осуществляют путем последовательного анализа различных точек объекта элементарным радиометрическим полем зрения, образующем на теле объекта площадь S . Мгновенное поле выбирают малым и быстро перемещают его по объекту. Распределение инфракрасной яркости $L(y,z)$ объекта при сканировании его площадкой S формирует в приемнике сигнал $S(t)$, амплитуда которого изменяется во времени в соответствии с изменением визируемой яркости. Сигнал $S(t)$ после усиления преобразуется в видимый сигнал. Воспроизведение инфракрасного изображения путем строчного анализа позволяет получить тепловую карту наблюдаемой зоны (связь между теплообменом в среде и ее строением).

Одним из информативных методов обнаружения дефектов труднодоступных узлов ГТД является метод инфракрасной термографии [9]. Его разделяют на активный и пассивный методы. Активный предполагает предварительный нагрев объекта. Наблюдения тепловых явлений на поверхности в результате распространения тепла по материалу могут дать информацию о его внутренней структуре. Используемый при этом источник тепла служит для создания в материале т.н. термоудара, а приемная термографическая система анализирует рассеяние и распространение тепловых волн.

Ограничения сферы применения метода связаны с тем, что наблюдения могут проводиться только в переходном режиме, когда определяются относительные скорости распространения теплового потока внутри материала. По достижении температурного равновесия тепловые контрасты

уже не наблюдаются. К тому же такие объекты как авиационные ГТД, имеют большую контролируемую поверхность, и осуществить их равномерный нагрев представляется затруднительным. Это касается и других функциональных систем самолета – гидравлической, топливной и др. Сложности в применении метода объясняются тем, что он зависит от большого числа параметров, которые должны быть учтены для каждого применения. К ним относятся:

- коэффициент излучения испытуемого материала;
- тип инфракрасного приемного устройства;
- поле зрения и размещение приемного устройства;
- скорость перемещения приемного устройства относительно объекта;
- природа и интенсивность нагрева (с помощью обычных источников или лазеров);
- фокусировка теплового потока;
- расстояние между источником тепла и испытуемым объектом;
- расстояние между источником тепла и инфракрасной приемной системой.

Существенным недостатком активного метода при оценке состояния функциональных систем ЛА и АД можно считать возможность контроля только тех деталей, которые находятся на его поверхности (корпусе). Доступ к остальным агрегатам требует их детальной разборки.

Более широкими возможностями в этом отношении обладает пассивный метод. Он заключается в использовании естественного тепла, выделяющегося в процессе функционирования ГТД, и в наблюдении с помощью пассивного приемного инфракрасного устройства распределения температур во времени и в пространстве. Сравнение с идеальной моделью рассеяния тепла позволяет определить все отклонения температуры, важные для процесса функционирования объекта. Разность температур отдельных зон характеризует условия теплоотвода от них, и, тем самым,

физико-химический состав, толщину, структуру, наличие дефектов и т.д. Пассивный метод представляется более перспективным и может быть использован для определения наиболее информативных точек на поверхности двигателя с целью установки в этих зонах встроенной системы контроля (термодатчиков).

Тепловая диагностика предполагает использование широкого спектра дорогостоящих средств [46]. При визуальном контроле для параллельного съема информации используют электронно-оптические преобразователи - эвапографы, эджеографы, приборы с жидкими кристаллами и фоточувствительными пленками, тепловизоры (рис. 3.3.) и т.п.



Рис. 3.3. Тепловизор TVS-200

Несмотря на это, бесконтактная тепловая диагностика является весьма перспективной в силу высокой информативности. Важно, что разработанные средства диагностики позволяют напрямую обнаруживать дефекты и прогнозировать их развитие в процессе испытаний ЛА и АД. Существующие методы обработки инфракрасного термометрирования дают возможность прогнозировать конкретные неисправности.

3.2.2. Возможности виброакустических методов оценки состояния АТ

Виброакустическая диагностика АТ также в достаточной мере информативна. Она базируется на общих принципах распознавания состояний технических систем по исходной информации, содержащейся в виброакустическом сигнале. В качестве диагностических признаков здесь используют характеристики виброакустического сигнала, сопровождающие

функционирование ГТД [13]. Как правило, уровень вибраций двигателя контролируется с помощью вибропреобразователей, которые сигнализируют о возможной неисправности в полете, но не позволяют определить конкретное место ее развития. При стендовых испытаниях для получения информации о вибронпряженности и колебаниях лопаток рабочих колес компрессора используют бесконтактные дискретно-фазовые методы. Их применение требует жесткого закрепления двигателя на стенде и установки на корпусе и роторе компрессора специальных вибропреобразователей. В настоящее время разрабатываются перспективные устройства и методы виброакустического анализа [20], не дошедшие пока до стадии массового эксплуатационного применения. Как упоминалось, голографические и акустические методы могут позволить определить наиболее информативные точки на корпусе двигателя (амплитуда, частота и фазовые характеристики вибрации, которые связаны с состоянием отдельных узлов и деталей). При обработке информации совокупность упомянутых параметров связывают с состоянием объекта $W(t)$ в момент (период) времени t [12]. При этом множество возможных состояний объекта делят на два подмножества. Подмножество W^* представляет собой совокупность работоспособных состояний, которые обладают запасом работоспособности, определяющим близость объекта к предельно допустимому состоянию. Подмножество W^{**} включает все состояния соответствующие появлению отказов в работе двигателя.

Для постановки диагноза все возможные состояния разбиваются на некоторое число классов W_i , $i=1,2, \dots, n$, подлежащих распознаванию. Но если число классов в подмножестве W^{**} определяется числом возможных отказов, то практически осуществить классификацию по степени работоспособности в подмножестве W^* не представляется возможным в силу непрерывности изменения этих состояний в пространстве диагностических признаков и времени. Кроме того, такая классификация затруднена

многопараметричностью объекта, каким и является газотурбинный двигатель.

Если дефект сопровождается повышенной виброактивностью, то важным здесь является локализация источников повышенного уровня колебательной энергии. При этом различают два возможных варианта: источники шума независимы либо статистически связаны. Уровень трудностей, обусловленный необходимостью разделения влияния источников, в значительной степени снижает информативность вибродиагностики ГТД. К мерам, повышающим ее информативность относят следующие:

- детальный опыт доводки в эксплуатацию двигателя с целью выявления наиболее уязвимых мест, четкое разбиение на конечное множество классов состояний, подлежащих распознаванию - $W = \{W_1, W_2, \dots, W_m\}$;
- обоснование эталонных значений вибропараметров;
- выбор средств измерения и мест их размещения на основе протекающих в ГТД физических процессов;
- локализация источников излучения повышенной колебательной энергии в исследуемом двигателе;
- определение динамических характеристик отдельных узлов, агрегатов и двигателя в целом для построения диагностической модели;
- разработка алгоритмов определения текущего состояния ГТД.

Важным моментом является формирование эталонов, представляющих собой усредненные для данного класса значения признаков. С помощью набора классифицирующих функций производится распознавание параметров виброакустического сигнала. В подсистеме принятия решения определяется фактическое состояние объекта контроля по текущим значениям параметров, которые могут быть использованы в качестве исходных при построении алгоритмов прогноза возможных отказов.

Несмотря на перечисленные меры, все же значительные трудности вызывает решение задачи локализации источников излучения повышенной виброактивности [17].

В последнее время при вибродиагностике ГТД начал находить применение метод оптической голографии [21], обладающий повышенной информативностью. Условием его эффективного использования также является создание эталонов (библиотеки вибропортретов дефектных состояний ГТД). Сначала получают эталонный вибропортрет исправного двигателя, а затем, вводя известные характерные дефекты, получают вибропортреты, соответствующие конкретным дефектным состояниям. Сравнение последних с эталонным может позволить определить информативные точки на поверхности двигателя, чувствительные к определенным дефектам. Для постановки диагноза достаточно идентифицировать вибропортрет исследуемого двигателя с набором, имеющимся в библиотеке. Однако этот метод пока не достаточно практически отработан и обеспечен аппаратурой.

Менее информативной, но более доступной считается диагностика АТ на основе построения диагностических моделей, т.е. связей между пространством состояний и пространством диагностических признаков. При этом не придается значения, в какой форме представлена эта связь. Считают, что диагностическая модель отвечает своему назначению, если она позволяет выполнить следующие условия:

- сформулировать принципы разбиения множества W на два подмножества - работоспособных W^* и неработоспособных W^{**} состояний;
- определить критерий для оценки степени работоспособности объекта и его принадлежности к одному из классов в подмножестве W^* ;
- установить признаки возникших отказов (различить состояния в подмножестве W^{**}).

В качестве диагностических моделей обычно используют дифференциальные и алгебраические уравнения, логические соотношения, матрицы узловых проводимостей, функциональные, структурные, регрессионные и другие модели, позволяющие связать параметры технического состояния с виброакустическим состоянием объекта. К основным типам моделей можно отнести [31]: структурно-следственные; динамические; регрессионные.

Структурно-следственная модель диагностируемого объекта создается на основе инженерного изучения его устройства и функционирования, статистического анализа показателей надежности и диагностических параметров. Она должна давать наглядное представление о наиболее уязвимых и ответственных элементах, а также связи структурных параметров с диагностическими признаками. Эту задачу необходимо решать при построении модели любого типа. Она решается на основе статистического анализа, что требует значительных затрат времени.

При построении динамической модели диагностирования объект рассматривают как многомерную систему с p входами и n выходами. Уравнение связи вектора входных воздействий

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$$

и вектора выходных сигналов

$$Y(t) = \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)\}$$

записывают в операторном виде $Y(t) = BX(t)$, где B - оператор системы, содержащий в неявном виде данные о параметрах технического состояния Z_i системы. На рис.3.4. показана простейшая модель "черного ящика". Изменение параметров технического состояния может вызвать изменение оператора при неизменном $X(t)$. В качестве критерия работоспособности динамического звена принимают степень соответствия действительного оператора B_i оператору нормального функционирования механизма B_{i0} , которую можно оценить значением невязки в соответствии со схемой,

приведенной на рис. 3.5., где X - возмущающее воздействие, Y_0 - реакция номинальной модели исследуемого динамического звена, ΔY - невязка, U - диагностический признак.

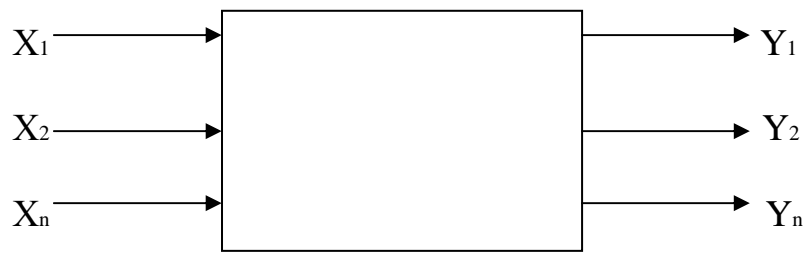


Рис. 3.4. Модель «черного ящика»

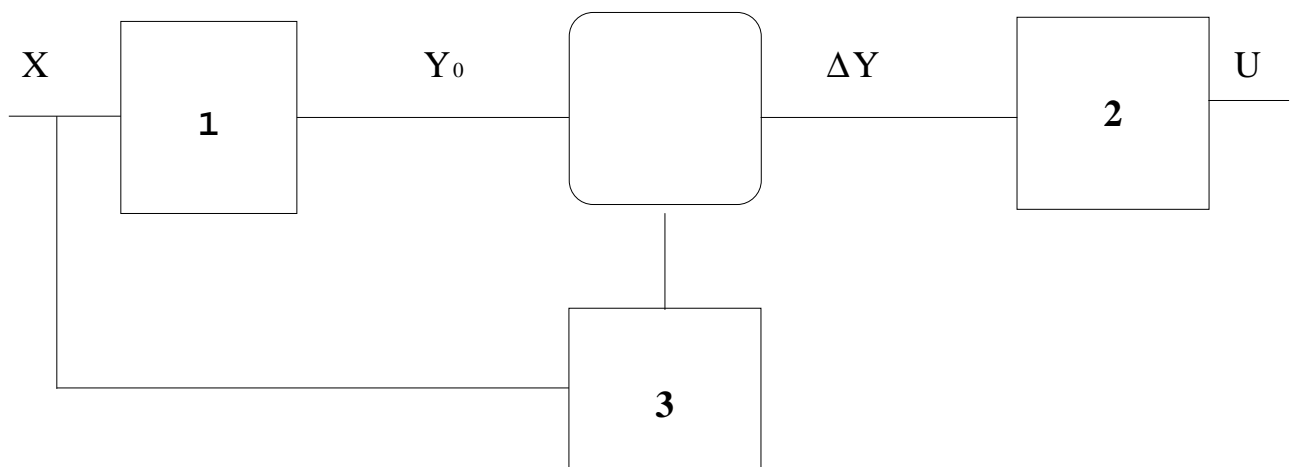


Рис.3.5.Простейшая схема динамического звена

- 1 - динамическое звено объекта контроля;
- 2 - формирующее звено;
- 3 - номинальная математическая модель.

С помощью уравнений идентификации можно сформировать модель «черного ящика», диагностические признаки, представляющие собой значения собственных частот, декремент колебаний и т.д. Однако их конкретизация зависит от понимания физики процессов, порождаемых развивающимся дефектом. К этому можно добавить, что использование сложного математического аппарата, необходимого при построении моделей данного типа, для решения практических задач часто представляется затруднительным.

Наиболее эффективным считают метод построения регрессионной модели, базирующийся на использовании математического аппарата планирования эксперимента [3]. С помощью этого метода ищут «характерный» диагностический признак, однозначно связанный с каким-либо параметром технического состояния. Задача моделирования сводится к нахождению коэффициентов регрессии и оценке адекватности модели в соответствии с определенными правилами. В процессе обработки результатов эксперимента оценивают следующие величины: дисперсию функции отклика по результатам параллельных опытов; дисперсию воспроизводимости функции отклика по результатам всех опытов; однородность дисперсий по F - критерию Фишера (коэффициенты регрессии; доверительный интервал коэффициентов регрессии; адекватность модели).

В результате анализа определяют характерный диагностический признак, являющийся функцией одного аргумента. Следует отметить, что несмотря на значительный уровень развития вибрационных диагностических моделей и алгоритмов построения диагностических процессов в целом, в большинстве случаев получают оценки состояния типа "норма - не норма", что в ряде случаев является недостаточным.

При решении задач локализации источников вибрации (повышения информативности), а также установления связей между структурными параметрами и параметрами сигнала, важное место отводится расшифровке последнего. Виброакустический сигнал любого механизма имеет сложную структуру, зависящую от динамики функционирования и набора комплектующих узлов. В настоящее время получен ряд зависимостей изменения характеристик виброакустического сигнала от возникающих дефектов типовых элементов различных механизмов, в том числе и применяющихся в авиационных двигателях [17]. Спектры вибрации измеряют на нескольких режимах работы ГТД для более надежного сопоставления расчетных частот с реальным частотным спектром вибрации. При обнаружении в некоторой полосе частот источника интенсивной вибра-

ции место его расположения определяют по пространственному распределению уровня вибраций конструкции.

Для некоторых рабочих процессов была найдена определенная связь режимных и виброакустических параметров. Например [13], в компрессорах вихревой шум пропорционален 3,5-5-й степени относительной скорости потока среды на лопатке, а сплошной шум подшипников качения в значительно меньшей степени зависит от нагрузки и частоты вращения ротора. Поэтому, если в данном механизме при изменении скоростного режима интенсивность шума нарастает пропорционально, например, 4-й степени частоты вращения ротора, то можно сделать вывод о его аэродинамическом происхождении. В ряде случаев [32] для выявления источников определяют форму колебаний, т.е. измеряют амплитуду и фазу, а также распределение возбуждающих сил.

Таким образом, методы виброакустической диагностики ГТД базируются на общих принципах диагностики технических систем по косвенным (в целом малоинформативным) параметрам. К тому же область их применения ограничена возможностью доступа к двигателю, а также несовершенством средств диагностирования и математических моделей, связывающих структурные параметры с диагностическими признаками. Тем не менее в ряде случаев можно получить количественную оценку запаса работоспособности узлов двигателя по результатам измерения виброакустических сигналов, что позволяет прогнозировать величины остаточных ресурсов элементов ГТД.

3.2.3. Эффективность трибодиагностики элементов ГТД

Процесс разрушения изнашиваемых деталей, как правило, начинается с разрушения поверхностного слоя материала под действием высоких динамических напряжений, что проявляется в виде отрывов частиц материала [14]. Это приводит к повышенной концентрации напряжений в местах отрыва и как следствие к дальнейшему развитию процесса

разрушения. При этом продукты износа уносятся маслом, циркулирующим в двигателе. Их наличие и накопление могут служить сигналом о возникновении неисправности.

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

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

Наиболее распространенными методами трибодиагностики являются: магнитный, спектрального анализа, колориметрический, феррографический, метод радиоактивных изотопов [32]. Каждый из них более информативен, чем методы вибродиагностики.

Магнитный метод (в ГА применяется прибор ПКМ, ранее ПОЖ-М). Метод основан на измерении силы взаимодействия ферромагнитных частиц масла с искусственно созданным внешним магнитным полем. Поскольку количество ферромагнитных металлов в работавшем масле двигателей обычно существенно больше, чем других продуктов износа, то их определение может служить интегральной оценкой степени износа трущихся пар двигателя.

Электромагнитный метод контроля, как разновидность магнитного метода, основан на взаимодействии переменного магнитного поля катушки индуктивности с электромагнитным полем, возникающим от вихревых токов металлических частиц в работающем масле. К недостаткам метода следует отнести малую чувствительность анализаторов, их подверженность влиянию внешних переменных полей, а также невозможность определения немагнитных частиц износа.

Эмиссионно-спектральный метод (в ГА применяются установки типа МФС, МОА, Spektrooil). Этот метод использует явление свечения газа

исследуемого вещества в результате нагревания его до температуры свыше 1000°C . При таких температурах энергия движения частиц газа такова, что при их столкновении происходят процессы диссоциации и ионизации, в результате которых, наряду с атомами и молекулами, в газе образуются свободные электрические заряды-ионы и электроны. Нагретый, частично ионизированный, проводящий электрический ток газ-плазма излучает электромагнитные колебания в оптическом диапазоне спектра. Существенной составляющей этого излучения являются линейчатые спектры атомов, в которых каждому элементу соответствует своя длина волны излучения определенной интенсивности. Исследуя спектр, можно определить химический состав образующего его газа, и, следовательно, состав анализируемой пробы.

Интенсивность аналитических спектральных линий (мощность излучения единицы объема плазмы) пропорционально связана с концентрацией соответствующих элементов в пробе. Установка позволяет определить не только качественный, но и количественный состав пробы. Для проведения количественного анализа необходимо выбрать адекватную модель спектроаналитического процесса (связь между сигналом и концентрацией исследуемого элемента) и провести с ее помощью градуирование установки.

Рентгеноспектральный метод (в ГА применяются установки типа БАРС-3, «СПЕКТРОСКАН», БРА-17, «ПРИЗМА»). Метод основан на регистрации длины волны и интенсивности характеристического флуоресцентного излучения химических элементов, входящих в состав «сухой» масляной пробы. Характеристическое излучение – это квантовое излучение с линейчатым (дискретным) спектром, возникающее при изменении энергетического состояния атома. Длина волны характеристического излучения зависит от атомного номера химического элемента и уменьшается по мере его возрастания. Явление флуоресценции связано с переходом атомов, молекул или ионов из возбужденных состояний

в нормальное состояние под действием характеристического излучения. Излучение возбуждается рентгеновскими лучами, направленными на масляную пробу. Характеристическое излучение определяемых элементов выделяется из вторичного излучения образца кристалл-анализатором и регистрируется с помощью шести селективных рентгеновских фильтров и шести пропорциональных счетчиков («Спектроскан»). Анализ начинается с

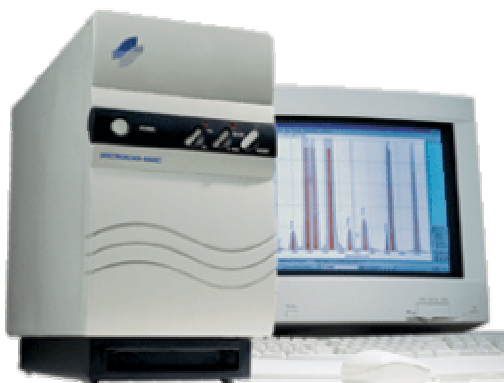


Рис. 3.6. Энергодисперсионный анализатор «Спектроскан Макс»

установки анализируемой пробы в пробо-загрузочное устройство спектрометра и продолжается от 10 до 1000 сек. в зависимости от анализируемого материала и требуемой точности анализа. Кванты излучения преобразуются в импульсы напряжения, скорость поступления которых измеряется и выводится на дисплей, и сохраняются в памяти компьютера, значения распечатываются на принтере. Спектрометр полностью управляется компьютером.



Рис.3.7. Рентгеноспектральный анализатор «ПРИЗМА»

Сцинтилляционный метод. Метод регистрации заряженных частиц с помощью счета вспышек света, возникающих при попадании этих частиц на

экран из сернистого цинка (ZnS), является одним из первых методов регистрации ядерных излучений [33]. Еще в 1903 г. Крукс и другие ученые показали, что если рассматривать экран из сернистого цинка, облучаемый частицами через увеличительное стекло в темном помещении, то на нем можно заметить появление отдельных кратковременных вспышек света — сцинтилляций. Было установлено, что каждая из этих сцинтилляций создается отдельной частицей, попадающей на экран. Круксом был построен простой прибор, названный спинтарископом Крукса, предназначенный для счета частиц. Визуальный метод сцинтилляций был использован в дальнейшем в основном для регистрации частиц и протонов с энергией в несколько миллионов электрон-вольт. Отдельные быстрые электроны регистрировать не удалось, так как они вызывают очень слабые сцинтилляции. Иногда при облучении электронами сернисто-цинкового экрана удавалось наблюдать вспышки, но это происходило лишь тогда, когда на один и тот же кристаллик сернистого цинка попадало одновременно достаточно большое число электронов. Гамма-лучи никаких вспышек на экране не вызывают, создавая лишь общее свечение. Это позволяет регистрировать частицы в присутствии сильного излучения. Визуальный метод сцинтилляций позволяет регистрировать очень небольшое число частиц в единицу времени. Наилучшие условия для счета сцинтилляций получаются тогда, когда их число лежит между 20 и 40 в минуту. Конечно, метод сцинтилляций является субъективным, и результаты в той или иной мере зависят от индивидуальных качеств экспериментатора. Несмотря на недостатки, визуальный метод сцинтилляций сыграл огромную роль в развитии ядерной и атомной физики. С помощью него Резерфорд регистрировал частицы при их рассеянии на атомах. Именно эти опыты привели Резерфорда к открытию ядра. Впервые визуальный метод позволил обнаружить быстрые протоны, выбиваемые из ядер азота при бомбардировке их частицами, т.е. первое искусственное расщепление ядра.

Сцинтилляционный метод регистрации возродился в конце сороковых

годов XX в. на новой основе. К этому времени были разработаны фотоэлектронные умножители (ФЭУ), позволяющие регистрировать очень слабые вспышки света. Были созданы сцинтилляционные счетчики, с помощью которых можно увеличить скорость счета в 108 и даже более раз по сравнению с визуальным методом, а также можно регистрировать и анализировать по энергии как заряженные частицы, так и нейтроны и гамма-лучи.

Сцинтилляционный счетчик представляет собой сочетание сцинтиллятора (фосфора) и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). В комплект счетчика входят также источник электрического питания ФЭУ и радиотехническая аппаратура, обеспечивающая усиление и регистрацию импульсов ФЭУ. Иногда сочетание фосфора с ФЭУ производится через специальную оптическую систему (светопровод). Принцип работы сцинтилляционного счетчика состоит в следующем. Заряженная частица, попадая в сцинтиллятор, производит ионизацию и возбуждение его молекул, которые через очень короткое время (10^{-6} — 10^{-9} сек.) переходят в стабильное состояние, испуская фотоны. Возникает вспышка света (сцинтилляция). Некоторая часть фотонов попадает на фотокатод ФЭУ и выбивает из него фотоэлектроны. Последние под действием приложенного к ФЭУ напряжения фокусируются и направляются на первый электрод (динод) электронного умножителя. Далее в результате вторичной электронной эмиссии число электронов лавинообразно увеличивается, и на выходе ФЭУ появляется импульс напряжения, который затем уже усиливается и регистрируется радиотехнической аппаратурой. Амплитуда и длительность импульса на выходе определяются свойствами как сцинтиллятора, так и ФЭУ. В качестве фосфоров используются: органические кристаллы, жидкие органические сцинтилляторы, твердые пластмассовые сцинтилляторы, газовые сцинтилляторы. Основными характеристиками сцинтилляторов являются: световой выход, спектральный состав излучения и длительность сцинтилляций. При прохождении заряженной частицы через сцинтиллятор в нем возникает некоторое число фотонов с той или иной энергией. Часть этих

фотонов будет поглощена в объеме самого сцинтиллятора, и вместо них будут испущены другие фотоны с несколько меньшей энергией. В результате процессов реабсорбции наружу будут выходить фотоны, спектр которых характерен для данного сцинтиллятора. Очень важно, чтобы спектр фотонов, выходящих из сцинтиллятора, совпадал или хотя бы частично перекрывался со спектральной характеристикой ФЭУ. Степень перекрытия внешнего спектра сцинтилляции со спектральной характеристикой данного ФЭУ определяется коэффициентом согласования.

ОАО «НПО «Сатурн» стало первым российским предприятием, которое вложило серьезные финансовые средства в разработку технологии диагностирования по результатам сцинтилляционных измерений ГТД серий Д-30КП/КУ/КУ-154. В рамках бюллетеней 1756БД-Г и 1772БД-Г специалистами разработан экспрессный количественный способ получения максимально возможной диагностической информации о параметрах частиц износа, находящихся в масле, в смывах с маслофильтра, магнитных пробок, фильтров-сигнализаторов и др. Использование сцинтилляционного анализатора масла позволило в диагностической авиационной практике оперативно оценивать не только общее техническое состояние двигателя по критерию «исправен» - «не исправен», но и отдельно оценивать техническое состояние подшипников трансмиссии и коробок приводов авиадвигателей.

Колориметрический метод (в ГА используются приборы типа КФК-2, ФЭК-М). В основу метода положен закон Ламберта-Бера и принцип измерения коэффициента пропускания света через исследуемую среду. На фотоприемник поочередно направляются световые потоки: полный и прошедший через эталонную и затем масляную среду, далее определяется отношение этих потоков. В качестве эталона используется либо дистиллированная вода, либо масло, соответствующее нормам ТУ. По значениям оптико-цветовых характеристик исследуемых проб масла и судят о состоянии узлов трения, омываемых маслом.

Отношение световых потоков, есть коэффициент пропускания или степень прозрачности исследуемого раствора $\tau = (F_{\lambda}/F_{m\lambda}) \cdot 100\%$.

Оптическая плотность (D) определяется по формуле $D = 2 - \lg \tau$.

Органолептический метод. При этом методе степень частиц износа выявляется визуально или с использованием каких-либо устройств и приспособлений (магнитные пробки, фильтры, сигнализаторы). Как известно [41], на двигателях применяются сигнализаторы стружки различного типа (электронные, электромеханические и др.). Эти сигнализаторы имеют один принципиальный недостаток, который связан с возможностью ложного срабатывания из-за накопления смолистых веществ в масле и различного рода посторонних загрязнений, не имеющих отношения к развитию дефекта. Сигнализаторы только фиксируют наличие износа, но не позволяют отслеживать скорость процесса накопления стружки в масле. Таким образом, этот метод недостаточно информативен с точки зрения точности выявления морфологии частиц износа.

Феррографический метод (в ГА используются феррографы типа RF, DR в основном импортного производства). Феррография - это метод микроскопического анализа частиц, отделенных от жидкостей. Метод обладает рядом преимуществ по сравнению с методами, упомянутыми выше, главным из которых является низкая погрешность измерений.

Для оценки состояния трущихся пар пользуются двумя типами феррографов. Это аналитический феррограф и прямопоказывающий феррограф. Последний оценивает массовую концентрацию примесей в пробе; с помощью аналитического феррографа изучаются морфологические признаки частиц износа с целью установления «адреса» дефекта [48].

Частицы, которые вместе с маслом стекают по наклонной поверхности пластины, изготовленной из кварцевого стекла, подвергаются воздействию градуированного магнитного поля, под воздействием которого Fe-частицы оседают в порядке убывания своего размера. Минимальный размер частиц - 3,0...5,0 мкм.

Концентрация частиц «улавливается» в двух областях: на входе в зону отложения и на расстоянии 4 мм от этой зоны. В этих точках производится измерение интенсивности прохождения света через отложения, которая пропорциональна концентрации частиц в пробе.

Метод радиоактивных изотопов

Использование метода радиоактивных изотопов заключается в установке на двигатель активированной детали, износ которой требуется определить. В процессе работы двигателя радиоактивные частицы вместе с остальными продуктами износа попадают в масло. Степень износа детали определяют на основе измерения радиоактивности масла [41]. Метод высокоинформативен, т.к. напрямую указывает «адрес» дефекта. Основными способами активации масла являются: установка радиоактивных вставок на заданных участках поверхности детали; облучение деталей нейтронами; введение изотопов в металлы во время их плавки; электролитическое покрытие деталей радиоактивным элементом.

Применение радиоактивных изотопов для исследования износа обладает рядом преимуществ. Этот метод обладает высокой чувствительностью и возможностью непрерывной регистрации измерений непосредственно при работе двигателя. С его помощью можно определять износ заданного участка детали. Кроме того, метод позволяет исследовать ряд вопросов, связанных с работой и износом двигателя: приработку деталей при пусках, характер изнашивания (коррозионный, механический и т.п.), расход масла и др.

Однако определение износа деталей методом радиоактивных изотопов представляет известную сложность. К этому необходимо добавить, что применение метода ограничено необходимостью специальной подготовки двигателя перед испытаниями, а также биологической защиты обслуживающего персонала от излучения. Метод позволяет оценивать износ только одной детали (или группы деталей). Одновременное раздельное определение износа нескольких деталей весьма сложно, т.к. требует

применения изотопов с различными энергиями излучения и специальной аппаратуры для отдельной регистрации этих излучений.

3.2.4. Эффективность диагностики жидкостных систем ЛА и АД

При диагностировании жидкостных систем АТ в условиях эксплуатации используют переносные и встроенные средства [32]. Большинство параметров, характеризующих состояние жидкостных систем, являются неэлектрическими величинами (давление, температура, расход рабочей жидкости и др.). Для удобства измерения и обработки диагностических параметров необходима их трансформация в электрические сигналы. Для этого используются различные преобразователи, которые классифицируются по своему принципу действия следующим образом, причем их функциональные возможности измерения параметров отмечены в скобках:

- ультразвуковые (расход, параметры рабочей жидкости);
- пьезоэлектрические (пульсации давления, вибрации);
- индукционные (частота вращения);
- трансформаторные (перемещение, давление, расход);
- фотоэлектрические (частота вращения, интенсивность излучения);
- индуктивные (давление, линейные перемещения);
- термопары, термосопротивление (температура);
- тензорезисторные (относительные перемещения);
- потенциометрические (давление, линейные и угловые скорости) и др.

Приемлемую точность измерения расхода имеют турбинные расходомеры типа РТСМ. В них измеряемые объемы жидкости отсекаются вращающейся крыльчаткой, а частота ее вращения свидетельствует о значении объемного расхода.

Простыми и надежными приборами для измерения избыточного давления являются пружинные манометры, для степени разряжения – т.н.

вакуумметры. В качестве чувствительных элементов в этих приборах используются различного рода мембраны, сильфоны, сельсины и т.п.



Рис.3.8. Течеискатель ИВУ-002:

- 1- электронный блок-преобразователь; 2- ультразвуковой щуп с кабелем;
3- программное обеспечение; 4- соединительный шнур подзаряда аккумулятора;
5- аккумулятор; 6- футляр

Для регистрации утечек рабочей жидкости применяются регистраторы особого типа, называемые термисторами (полупроводниковые микротермосопротивления). Термисторы применяют для оценки внутренней негерметичности жидкостных систем. Они устанавливаются в сливные магистрали. Причиной внутренней негерметичности является обычно износ золотников, уплотнительных втулок и других элементов в агрегатах жидкостных систем, образующих пары трения. Пульсации давлений жидкости передаются на корпус агрегатов с ультразвуковой частотой. Наибольшая амплитуда колебаний возникает в том месте корпуса агрегата, где расположены изношенные пары трения. Для измерения колебаний и преобразования их в электрический сигнал в ГА применяют ультразвуковые индикаторы типа ТУЗ-1, ИКУ-1, ИВУ-002/5-МП, Т-2001 и др., называемые течеискателями (рис.3.8). Метод течеискания достаточно информативен, однако заключение о неисправности агрегатов жидкостно-газовых систем АТ делается на основе косвенных признаков, что в некоторой степени снижает информативность.

3.2.5. Эффективность диагностики ГТД по термогазодинамическим параметрам

В соответствии с общепринятыми концепциями к термогазодинамическим параметрам относят: давление, температуру, отношение давлений и температур, скорость течения, расход топлива и масла, проходные площади сечений проточной части, тягу, а также частоту вращения роторов. Информативность термогазодинамической диагностики ГТД невысока.

Общие подходы здесь не отличаются от подходов, применяемых при вибро- или модельном диагностировании, рассмотренных выше. Имеются лишь некоторые специфические отличия. Обычно при термогазодинамическом диагностировании ГТД применяется метод математического моделирования «поведения» вышеперечисленных параметров в процессе работы двигателя. Различают детерминированные, вероятностные и комбинированные модели ГТД. В детерминированных моделях все взаимосвязи, переменные и константы задаются точно (что весьма сложно при профилактике отказов). Данное условие обеспечивает возможность однозначного определения результирующей функции. В вероятностных моделях задаются соответствующие законы распределения случайных величин, что приводит к вероятностной оценке этой функции. Чаще применяют детерминированные модели. Здесь признаками состояния двигателя могут быть: тяга R , расход топлива Cr , температура газов перед (T) или за турбиной (T_2), параметры рабочего тела по тракту, параметры топливной, масляной систем и т. д. Примерами возможных неисправностей могут служить: прогары лопаток турбины, жаровой части камер сгорания, деформация элементов проточной части и т. п. Решения принимают по критическим отклонениям термогазодинамических параметров.

Изменение температуры газа за турбиной сравнивают с эталонной математической моделью. Эталонная модель строится по исходным формулярным данным двигателя. Температура контролируется на взлетном

режиме, которому соответствует контрольная температура за турбиной. В некоторых случаях температуру T , а также параметры T_n и P_n используют для подсчета тяги двигателя и сравнивают ее с той тягой, которая должна быть в конкретно заданных условиях.

Определенные возможности заложены в диагностический параметр «расход топлива». Опыт показывает [16], что повреждение проточной части ГТД увеличивает расход топлива на 120... 150 кг/ч при одновременном изменении других термодинамических параметров. Расход топлива достаточно хорошо отражает состояние камер сгорания и сопловых аппаратов турбин. Однако точное измерение расхода затруднено из-за погрешностей расходомеров, вызванных необходимостью учета плотности керосина при разных температурах.

В определенных условиях диагностику ГТД можно осуществлять и по давлению топлива перед форсунками P_f , но и здесь погрешности измерений могут играть решающую роль.

Для минимизации погрешностей оценки состояния ГТД по результатам измеренных термогазодинамических параметров, значения параметров приводят к стандартным условиям, а их измерение должно проводиться на одних и тех же высотах и режимах работы двигателя.

Результаты исследований в области термогазодинамической диагностики ГТД позволили установить, что самым чувствительным и информативным показателем состояния проточной части двигателей является адиабатический КПД турбины η_t [16]. Конечно, непосредственно замерить η_t невозможно, однако, его можно выразить через частоту вращения роторов, степень повышения давления π_k и температуру газов перед турбиной T_2^* . Эта зависимость будет эмпирической и специфичной по отношению к данному типу двигателя.

Детерминированные модели диагностирования ГТД могут выражаться через систему уравнений состояния двигателя, решив которую можно

сформировать диагноз, осуществить прогноз и дать рекомендации по предупреждению или устранению возможного отказа. Диагностические уравнения представляют собой конечное множество выражений, построенных для приращения расхода воздуха, температуры газа перед турбиной, удельного расхода и других термогазодинамических параметров. В правой части этих уравнений содержатся отклонения параметров, которые определяют путем сравнения текущих значений с эталонными значениями (при определенном режиме работы двигателя).

Наиболее ответственным этапом термогазодинамического диагностирования ГТД является составление диагностических уравнений. Число диагностических уравнений определяется классами возможных состояний ГТД.

В последнее время для диагностики ГТД предлагается использовать комплексные параметры, которые в аналитической форме связывают между собой несколько параметров и, тем самым, наиболее полно характеризуют рабочие процессы, происходящие в двигателе. Так, для диагностирования ТВД в ряде предприятий используют отношение температуры газов за турбинной T_2 к давлению масла в измерителе крутящего момента $P_{икм}$. При этом в качестве критерия оценки состояния двигателя по комплексному параметру используют относительное отклонение контролируемого параметра от эталонного:

$$\Delta K = B_{зам} - B_{э},$$

где $B_{зам} = T_2/P_{икм}$ - комплексный параметр, приведенный к стандартным атмосферным условиям. Использование данной величины для контроля технического состояния ТВД в процессе проведения стендовых испытаний, а также в условиях эксплуатации оказалось эффективным для оценки работоспособности двигателя.

3.2.6. Методы диагностики проточной части ГТД

Наряду с описанными выше методами контроля и диагностики АТ наиболее общую и оперативную информацию о состоянии ответственных узлов и деталей двигателя, таких как лопатки компрессора и турбины, камеры сгорания, диски, сварные швы корпусов и т. д., дают оптические методы контроля с использованием бороскопов, фиброскопов и эндоскопов. Этими приборами успешно выявляется обширная группа дефектов типа: трещин, прогаров, короблений (нарушение макрогеометрии деталей), коррозии, эрозии, выработки контактных поверхностей, износа элементов лабиринтных уплотнений, нагарообразования и др.

На сегодняшний день на российском рынке предлагают свою продукцию ряд отечественных и зарубежных фирм – изготовителей эндоскопов: «Интек», «Карл Шторц», «Намикон», «Олимпас», «Оптимед», «Рихард Вольф», «Мачида», «СиМТ», «Казанское оптико-механическое объединение», «Точприбор», «Эверест-ВИТ» и др. Существующие оптические приборы для обнаружения указанных дефектов условно можно разделить на три группы [34,35].

Первая группа приборов — это прямые эндоскопы с линзовой оптикой, торцовым и боковым зрением, с прямыми и угловыми окулярами. Эти приборы различаются по диаметру и длине рабочей части. У них различные оптические характеристики и различная механизация. К этой группе относятся такие приборы, как Н-200, УСП-8М, РВП-491 и ряд других.

Эндоскопы предназначены для осмотра и выявления поверхностных дефектов (трещин, забоин, рисков и т. д.) на рабочих лопатках всех ступеней компрессора и турбины двигателей в эксплуатации. Конструкция прибора позволяет оператору не меняя своего положения, осматривать все поверхности, расположенные вокруг рабочей части эндоскопа. При подготовке к работе прибор подключают к источнику электрического тока и вводят через смотровой лючок в корпусе в проточную часть двигателя.

Эндоскоп УСП-8М служит для осмотра и выявления дефектов на

сопловом аппарате турбины первой ступени, форсунках и стенках камеры сгорания. Конструктивно он состоит из трубы с объективом, осветительным устройством и окуляра.

Эндоскоп РВП-491 предназначен для осмотра рабочих лопаток турбины и по конструкции аналогичен эндоскопу УСП-8М. Для фиксации объектива на определенном расстоянии от объекта, а также для удобства работы с прибором во время осмотра имеется упор, которым прибор устанавливается на кромку осматриваемой лопатки.

Ко второй группе приборов можно отнести эндоскопы с одним или несколькими подвижными звеньями, соединенными между собой универсальными оптическими шарнирами. Их отличительной чертой является возможность осмотра криволинейных каналов.

Эндоскоп Н-185 предназначен для обнаружения трещин на промежуточном кольце соплового аппарата первой ступени турбины двигателя косвенным методом, заключающемся в осмотре задней внутренней оболочки турбины с целью обнаружения на ней цветов побежалостей, образующихся от газов, выходящих из внутреннего контура двигателя через трещины (при наличии таковых) на промежуточном кольце соплового аппарата. Конструктивно прибор представляет собой трубу, состоящую из объективной части с поворотными и неподвижными звеньями («коленами») основной, промежуточной, трех удлинительных труб и окуляра. На подвижном звене объективной части укреплено осветительное устройство. Все части прибора легко собираются и разбираются без применения инструмента. Эндоскоп Н-170 предназначен для осмотра и выявления дефектов на сопловом аппарате первой ступени турбины, форсунках и деталях камеры сгорания. Прибор представляет собой довольно сложную шарнирно-линзовую систему, состоящую из головного звена с объективом и осветительным устройством, нескольких промежуточных звеньев и звена окуляра, соединенных между собой при помощи оптических шарниров. Благодаря большому числу степеней свободы прибор проникает через

сложный криволинейный канал — смотровые лючки в оболочках двигателя и кольцевую камеру сгорания, обеспечивая тем самым контроль нижней части соплового аппарата, форсуночной плиты и элементов камеры сгорания на двигателях, которые не имеют нижних лючков.

К третьей группе диагностических приборов относятся волоконно-оптические эндоскопы с гибкой рабочей частью (рис.3.9). Представителем этой группы являются отечественные эндоскопы типа Н-280, ряд эндоскопов фирмы «СиМТ» (медтехника), а также импортные «Олимпас», предназначенные для осмотра и выявления дефектов практически на всех элементах турбокомпрессора и камеры сгорания. Кроме того, упомянутые фирмы также включены в государственный реестр контрольно-измерительных средств, разрешенных к использованию в ГА России.

Волоконно-оптическая дефектоскопия основывается на перспективных достижениях технической физики, электроники, радиотехники, вычислительной техники и механики. Совокупное использование преимуществ отдельных элементов и устройств обеспечивает более эффективную реализацию алгоритмов и программ по восприятию и обработке первичной информации. Функциональные возможности оптики, важные свойства элементов оптоэлектроники, классические методы механики в сочетании с уникальными свойствами волоконной оптики и процессорной техники позволяют оптимизировать структуру и состав технических средств эндоскопии, как по качеству, так и по надежности.

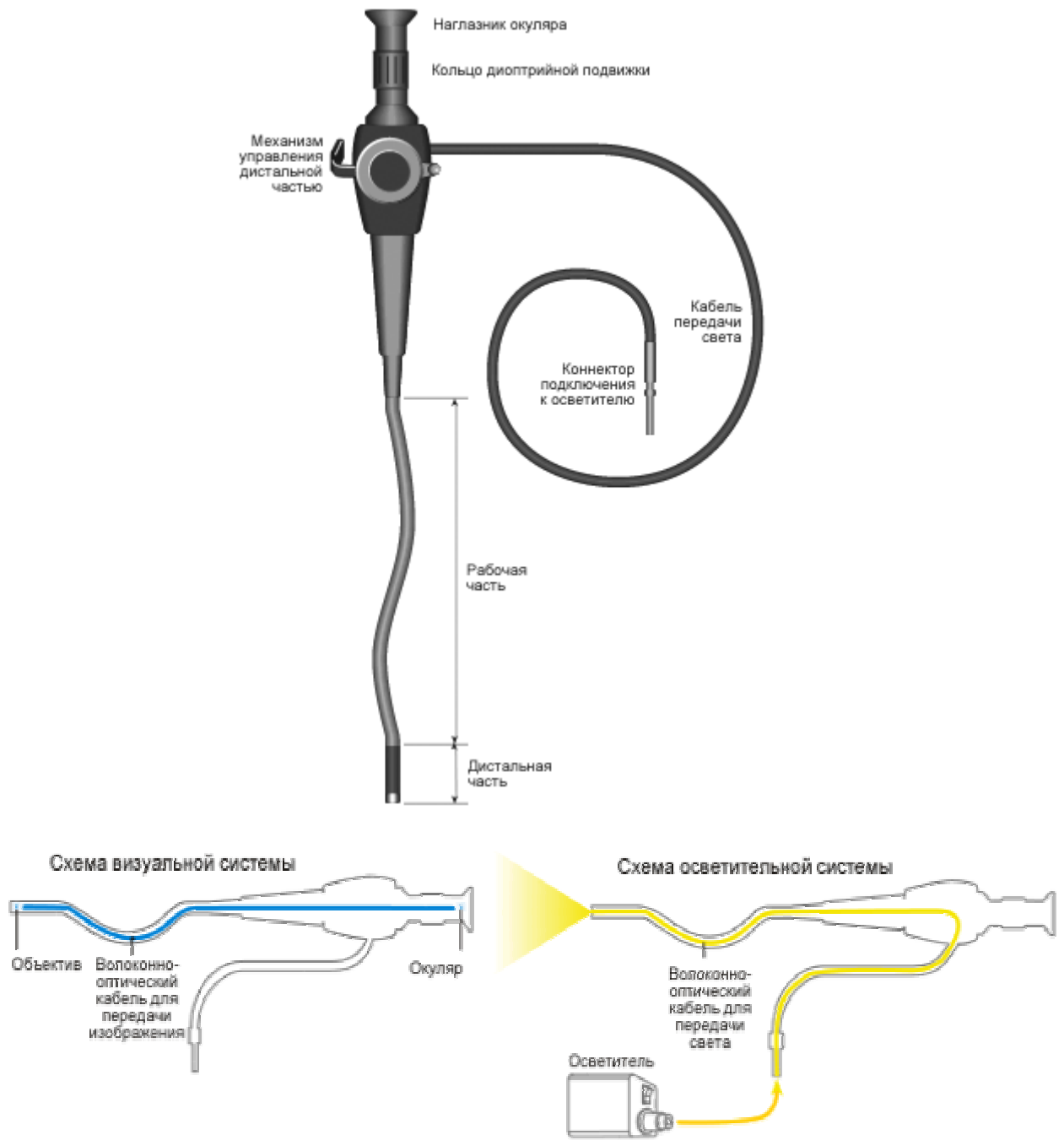


Рис.3.9. Модель гибкого эндоскопа.

Техническую основу волоконно-оптической эндоскопии составляет множество различных по исполнению, формам, размерам и материалам

элементов традиционной волоконной оптики [22]. Преимущественное применение находят единичные одножильные световоды и многожильные жгуты из цилиндрических или конических моноволокон.

Эндоскопы состоят из неразборной трубы с окуляром и осветителем, объектива и волоконных световодов, предназначенных для подсветки и передачи изображения по криволинейному каналу.

В последнее время ведутся разработки новых оптических приборов. Гибкие фото-видео эндоскопы изначально разрабатывались с учетом требований документирования результатов контроля. Так, например, фотоэндоскоп Н-300 предназначен для осмотра и фотографирования рабочих лопаток всех ступеней компрессора и турбины двухконтурных двигателей как со стороны входных, так и со стороны выходных кромок. В отличие от известных эндоскопов с фотоприставками Н-300 имеет штатный фотоаппарат и оптическую систему, позволяющую одновременно производить как визуальное наблюдение, так и фотографирование без каких-либо переналадок материальной части. Наличие в поле зрения прибора масштабной сетки для определения величины дефектов, поворотные объективы, окуляр, управляемая объективная призма и универсальный штатив на регулируемой сферической опоре делают Н-300 особенно удобным для массовых осмотров рабочих лопаток двигателей в эксплуатации.

Эндоскоп Н-295 помимо обычной механизации снабжен откидным дистанционно-управляемым зеркалом, что позволяет через один лючок осматривать рабочие лопатки компрессора с двух сторон.

Волоконно-оптический эндоскоп Н-290 предназначен для осмотров криволинейных профильных каналов, образованных деталями осей створок реверса тяги.

Особенностью гибких видеоскопов (например, 6 серии Olympus IV6C6, IV8C6, 7 серии Olympus – IPLEX SX) является установка миниатюрной телевизионной камеры непосредственно за объективом на дистальном конце

рабочей части световода. Данная конструкция при современном уровне технологии производства цветных миниатюрных объективов (350000 – 550000 пикселей) позволяет резко повысить (по сравнению с фиброскопом одинакового диаметра) качество создаваемого изображения. При этом выходной сигнал обрабатывается и может быть записан на штатных накопительных устройствах (Flash карте до 512 Мб и более) как в виде цифрового снимка, так и в реальном времени на видеомagneитофоне различного формата.

Наряду с эндоскопами в практике диагностики проточной части ГТД все шире находят применение некоторые дефектоскопы. В частности, диски турбины контролируются на наличие микротрещин вихретоковым прибором «Фазек» (Германия), преобразователь которого закрепляется в межлопаточном канале соплового аппарата турбины. Кромки лопаток турбины проверяются индуктивным дефектоскопом ЗИТ-1СМА.

Информативность рассмотренных методов весьма высока. Рассмотренные средства контроля хорошо зарекомендовали себя в эксплуатации.

3.3. Методы обобщенной оценки состояния технических систем

3.3.1. Методы сверток частных параметров контроля к обобщенному показателю

Анализ существующих методов безразборной диагностики АТ показал, что в настоящее время каждый из методов имеет определенную область применения и позволяет оценить состояние отдельных узлов и агрегатов. Для полного и детального контроля целесообразно использовать совокупность различных методов. При этом возникает необходимость обобщения диагностической информации. Существует ряд подходов к обобщенной оценке состояния технических систем [29,30,31]. Они сводятся к выявлению информативного обобщенного параметра состояния объекта. Идея заключается в том, что процесс постепенного изменения уровня

работоспособности, характеризуемый многими компонентами, описывается одномерной функцией, численные значения которой зависят от контролируемых компонентов процесса. Такая функция рассматривается как обобщенный параметр процесса. При этом может оказаться, что обобщенный параметр не имеет конкретного физического смысла, а является математическим выражением, построенным искусственно из контролируемых компонентов процесса.

Обобщенный параметр должен соответствовать определенным требованиям. Эти требования в числе других предусматривают обработку частных параметров контроля, включающую:

- ранжирование по степени значимости;
- определение среди частных параметров критерия, имеющего решающее значение при постановке диагноза объекта.

Частные параметры ранжируют на 3 группы: существенные, второстепенные и несущественные. Для каждой группы определяют по статистическим данным свои весовые коэффициенты и назначают пределы допуска. Среди существенных параметров выбирается один, изменение которого полагают определяющим при оценке реакции состояния объекта в целом [27]. Практическое использование такого подхода при подготовке частных параметров для включения их в качестве составляющих в обобщенный параметр представляется затруднительным. Поскольку статистические данные по множеству ГТД не отражают текущего состояния конкретного двигателя, то при эксплуатации по фактическому состоянию необходимо использовать вместо них данные контроля. При этом для разных двигателей в разные моменты времени существенность каждого параметра может быть не адекватна. Она определяется остаточной надежностью двигателя по данному параметру. Следовательно, разбиение частных параметров на группы по их существенности для всего периода эксплуатации не представляется возможным. Кроме того, в каждом конкретном случае решающее значение для оценки работоспособности ГТД

может иметь любой параметр, уход которого за пределы допуска способен привести к отказу. Таким образом, предлагаемый подход к ранжированию частных параметров в большей степени ориентирован для использования при организации плано-предупредительной стратегии эксплуатации и не вполне применим для эксплуатации ГТД по фактическому техническому состоянию.

К обобщенному параметру предъявляются следующие основные требования. Параметр должен:

- максимально характеризовать качество объекта;
- быть критичным к изменению частных параметров;
- характеризовать наступление критического состояния объекта.

При свертке частных параметров к обобщенному, необходимо решить следующие задачи:

- определить относительные значения частных параметров;
- оценить значимость частного параметра для оценки состояния объекта;
- построить математическое выражение для обобщенного параметра.

Определение относительных значений частных параметров считают необходимым, поскольку состояние объекта может характеризоваться параметрами, имеющими различную размерность. Все контролируемые параметры приводят к единой системе измерения, в которой они могут быть сравнимыми. Одной из таких систем является система безразмерного (нормированного) относительного исчисления. Для каждого параметра x_i ($i = 1, k$) выделяют допустимое значение x_i^* , при достижении которого объект теряет работоспособность и оптимальное, с точки зрения надежности, значение x_{ionm} (как правило, оно равно номинальному значению x_{in}). Если в процессе эксплуатации соблюдается условие $x_i(t) > x_i^*$, тогда можно записать безразмерный (нормированный) параметр $x_i'(t)$ в виде:

$$x_i'(t) = \frac{x_i(t) - x_i^*}{x_{ionm} - x_i^*} \quad (3.1)$$

Таким образом, с помощью выражения (3.1) нормируется параметр $x_i(t)$, а безразмерная нормированная величина $x_i'(t)$ изменяется с течением времени от 1 до 0. Отсюда, по величине $x_i'(t)$ судят о степени работоспособности объекта по данному параметру. Для решения частных задач предлагаются и другие нормирующие выражения применительно к конкретным случаям:

$$x_i'(t) = x_i(t) / x_{i0} \quad \text{или} \quad x_i'(t) = x_i(t) / x_{in};$$

$$x_i'(t) = x_i(t) / x_{imax};$$

$$x_i'(t) = x_i(t) / Mx_i;$$

$$x_i'(t) = [x_i(t) - x_{imy}] / x_{imy},$$

где x_i , x_{i0} , x_{imax} , x_{imy} , Mx_i - соответственно текущее, нулевое, максимальное, заданное по ТУ значения и математическое ожидание 1-го параметра.

Следовательно, нормирование параметров позволяет получить совокупность безразмерных величин, которые характеризуют состояние объекта. Однако количественно одинаковое изменение этих величин не является равнозначным по степени влияния на изменение уровня работоспособности объекта. Поэтому необходимо дифференцировать частные параметры. Этот процесс осуществляется с помощью весовых коэффициентов, величины которых характеризуют существенность соответствующих параметров. При оценке состояния объекта каждому из частных параметров x_1, x_2, \dots, x_n ставят в соответствие весовые коэффициенты V_1, V_2, \dots, V_n , удовлетворяющие тем или иным заданным критериям, причем $0 < V_n < 1$.

Степень работоспособности объекта по множеству контролируемых параметров оценивается с помощью выражения (3.2):

$$Q_{\Sigma}(t) = \frac{\sum_{i=1}^k \nu_i [x_i(t)]^{\nu_i}}{\sum_{i=1}^k \nu_i}, \quad (3.2)$$

где $Q_{\Sigma}(t)$ - текущее значение обобщенного параметра. Из определения обобщенного параметра следует, что чем большие величины $x_i(t)$ и ν_i , тем больший вклад i -го параметра в $Q_{\Sigma}(t)$. Весовые коэффициенты выбирают на основе использования статистических данных о физической значимости i -го параметра и с учетом флуктуации в функциях $x_i(t)$ и ν_i . Обобщенный параметр можно подсчитать с помощью выражения вида (3.3)

$$Q_{\Sigma}(t) = \left[\frac{\sum_{i=1}^k [x_i(t)]^{\frac{1}{\nu_i}}}{k} \right]^{\sum_{i=1}^k \nu_i}, \quad (3.3)$$

которое представляет собой нелинейное среднее. Здесь $Q_{\Sigma}(t)=1$, если все $x_i(t) = 1$. Кроме того, чем больше $x_i(t)$ и ν_i , тем больший вклад вносит слагаемое $[x_i(t)]^{\frac{1}{\nu_i}}$ в величину $Q_{\Sigma}(t)$.

Можно использовать и другой вариант нелинейного среднего:

$$Q_{\Sigma}(t) = \frac{\sum_{i=1}^k \nu_i [x_i(t)]^{\frac{1}{\nu_i}}}{\sum_{i=1}^k \nu_i}, \quad (3.4)$$

где при $Q_{\Sigma}(t)=1$, $x_i(t) = 1$. Для определения обобщенного параметра используется выражение для параметрического среднего, в частности

$$Q_{\Sigma}(t) = \left[\frac{\sum_{i=1}^k [x_i(t)]^{p/v_i}}{k} \right]^{\frac{1}{p}}, \quad (3.5)$$

где $p \geq 1$ подбирается так, чтобы критерий давал лучшее приближение к реальным результатам получаемым экспериментальным путем. При рассмотрении выражений для обобщенных параметров считается, что $x_i(t)$ не меняет знака, т.е. всегда $x_i(t) \geq x_i^*$. Если же учитывать знак, то каждое слагаемое в выражениях (3.2)-(3.5), стоящее под знаком суммы, дополнительно умножается на член вида $\text{sign}[x_i(t)-x_i^*]$. В этом случае выражение (3.2) примет вид

$$Q_{\Sigma}(t) = \frac{\sum_{i=1}^k v_i [x_i(t)]^{v_i} \cdot \text{sign}[x_i(t) - x_i^*]}{\sum_{i=1}^k v_i}. \quad (3.6)$$

В тех случаях, когда в изменениях $x_i(t)$ много случайного и погрешности измерений велики, в обобщенные параметры целесообразно вводить интегральные значения безразмерных параметров $x_i(t)$:

$$Q_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^k v_i \cdot \int_{t_j}^{t_{j+1}} x_i(t) dt, \quad (3.7)$$

где $(t_j \dots t_{j+1})$ - интервал обработки или контроля.

Если обобщенный параметр представить в виде произведения частных параметров

$$Q_{\Sigma}(t) = \left[\prod_{i=1}^k [x_i(t)]^{v_i} \right]^{\frac{1}{k}}, \quad (3.8)$$

то выход любого параметра за допустимые пределы, т.е. $x_i(t)=0$, приводит к равенству $Q_{\Sigma}(t)=0$. Следовательно, выражение (3.8) позволяет

характеризовать наступление отказа по любому из контролируемых параметров. По обобщенным параметрам предлагают определять текущий уровень работоспособности многопараметрического объекта и характер его изменения во времени. Таким образом, задача сводится к прогнозированию одномерной временной функции вида $Q_{\Sigma}(t_0), Q_{\Sigma}(t_1) \dots Q_{\Sigma}(t_n)$.

Наряду с очевидными преимуществами обобщенной оценки состояния технических систем, рассмотренные подходы к определению обобщенного параметра обладают определенными недостатками, затрудняющими их практическое использование.

Необходимость введения весовых коэффициентов для учета существенности нормированных частных параметров приводит к снижению объективности общей оценки уровня работоспособности объекта, поскольку решение этой задачи базируется на использовании статистических данных без учета технологических и эксплуатационных особенностей конкретного объекта. Обобщенные и нормированные частные параметры лишены физического смысла, что также затрудняет оценку существенности их влияния на состояние объекта. Кроме того, все рассмотренные выражения для обобщенного параметра, за исключением (3.8), не позволяют получить однозначную характеристику наступления отказа объекта, что недопустимо при оценке состояния ГТД. В случае выхода за пределы допуска одного из нормированных параметров обобщенный параметр может иметь некоторое численное значение за счет вклада остальных частных параметров. Таким образом, оценка состояния ГТД по предлагаемым обобщенным параметрам не исключает возможности пропуска отказа по одному из частных параметров контроля. Следовательно, оценить запас работоспособности ГТД, определить сроки профилактических мероприятий при рассмотренных подходах представляется затруднительным.

Наряду с рассмотренными вариантами определения обобщенного параметра существуют подходы, основанные на использовании в качестве такового вероятности безотказной работы объекта [40], а также некоторого функционала, описывающего

зависимость суммарных выходных характеристик объекта от входных. Однако эти подходы также представляются в определенной степени удаленными от структурных параметров ГТД. Анализ изменения величины вероятности безотказной работы, как правило, не позволяет сделать вывод о том, по вине какого элемента произошло ее снижение. Кроме того, эти подходы основываются на использовании статистических данных и не позволяют учесть конкретные условия эксплуатации и фактическое состояние двигателя, а также требуют значительного времени для набора данных, в течение которого двигатель часто морально устаревает. При организации эксплуатации технических систем по ресурсу в качестве показателя работоспособности предлагают использовать величину остаточного ресурса наименее надежного элемента объекта. Это позволяет определить время наступления критического состояния, следовательно, и сроки прекращения эксплуатации двигателя. Однако наименьший остаточный ресурс характеризует запас работоспособности двигателя по времени, но не уровень работоспособности в целом, который определяется состоянием всех узлов и деталей, способных привести к отказу. Следовательно, такая оценка не может считаться обобщенной.

3.3.2. Методы обобщенной оценки состояния технических систем по информационному критерию

Одним из подходов к обобщенной оценке состояния технических систем является определение количества информации, характеризующей уровень работоспособности объекта при его контроле [45]. Это позволяет установить однозначную количественную связь между пространством состояний, определяемых структурными параметрами объекта и пространством диагностических признаков этих состояний. Другими словами степень изменения работоспособности объекта характеризуется количеством информации, получаемой при контроле. Существенным достоинством информационных оценок является возможность рассмотрения исследуемого объекта в его взаимосвязи с системой контроля.

Пусть $J_A(B)$ – ожидаемое значение информации, содержащееся в системе контроля B относительно всех состояний объекта A . Обозначив

$J_A(B)$ как среднюю информацию, содержащуюся в системе контроля относительно состояния A_i , получим:

$$J_A(B) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot J_{A_i}(B), \quad (3.9)$$

где $P(A_i)$ - вероятность i -го состояния объекта A ($i=1, n$); n - выделенное количество состояний объекта A .

В соответствии с определением условной энтропии [76] можно записать:

$$H(A/B) = H(AB) - H(B),$$

где $H(AB)$ - энтропия сложной системы (AB) ; $H(B)$ - энтропия системы контроля B .

Используя соотношение для $J_{A_i}(B)$, выразим:

$$J_A(B) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(A_i) \cdot P(B_j/A_i) \cdot \log \left[\frac{P(B_j/A_i)}{P(B_j)} \right], \quad (3.10)$$

где $P(B_j)$ - вероятность нахождения системы контроля B в j -м состоянии ($j=1, m$); $P(B_j/A_i)$ - условная вероятность j -го состояния системы контроля B при нахождении объекта A в i -м состоянии.

Теперь с учетом (3.9) и (3.10) выражение для средней информации в системе контроля о состоянии объекта A_i примет вид:

$$J_{A_i}(B) = \sum_{j=1}^m P(B_j/A_i) \cdot \log \left[\frac{P(B_j/A_i)}{P(B_j)} \right] \quad (3.11)$$

или в эквивалентной форме:

$$J_{A_i}(B) = \sum_{j=1}^m P(B_j/A_i) \cdot \log \left[\frac{P(B_j/A_i)}{P(A_i)} \right]. \quad (3.12)$$

Для решения практических задач:

$$J_{A_i}(B) = \sum_{j=1}^m P(B_j/A_i) \cdot \log \left[\frac{P(A_i/B_j)}{P(B_j) \cdot P(A_i)} \right], \quad (3.13)$$

где $J_{A_i}(B)$ представляет собой среднее значение информации, которую можно получить от системы контроля об i -м состоянии объекта. Поскольку объект и система контроля взаимосвязаны, то полагают, что каждое из состояний B может содержать информацию относительно какого-либо состояния объекта A . Информация, которую дает состояние B_j о состоянии A_i , определяется из соотношения:

$$J_{A_i}(B_j) = \log \left[\frac{P(B_j/A_i)}{P(B_j)} \right]. \quad (3.14)$$

Отсюда следует вывод, что $J_{A_i}(B)$ представляет собой усреднение этой информации по всем состояниям системы B при условии, что эта информация относится к состоянию A_i :

$$J_{A_i}(B) = \sum_{j=1}^m P(B_j/A_i) \cdot J_{A_i}(B_j). \quad (3.15)$$

Величину $J_{A_i}(B_j)$ называют элементарной информацией состояний B_j о состоянии A_i . Величины $J_{A_i}(B)$ и $J_{A_i}(B_j)$ являются усреднением элементарной информации. Вместе с тем, элементарной информации придают конкретный физический смысл.

Система контроля B может быть представлена системой признаков, связанных с состоянием объекта A . Тогда, если сигнал B встречается одинаково часто при наличии состояния A_i и при любых других состояниях объекта A , т.е. $P(B_j/A_i) = P(B_j)$, то, очевидно, что такой сигнал не несет информации о состоянии A_i . Из выражения (3.13) видно, что в этом случае $J_{A_i}(B_j) = 0$. Если априорная вероятность состояния A_i равна $P(A_i)$, а после получения сигнала B_j она изменится и станет $P(A_i/B_j)$, то по известному состоянию можно получить некоторую информацию относительно A_i :

$$J_{A_i}(B_j) = \log \left[\frac{P(A_i/B_j)}{P(A_i)} \right]. \quad (3.16)$$

Однако вероятность состояния A_i после получения сигнала может стать больше или меньше априорной вероятности в зависимости от характера

связи этих вероятностей. $J_{A_i}(B_j)$ может быть как положительной, так и отрицательной величиной, тогда как $J_{A_i}(B)$ и $J_A(B)$ всегда положительны или равны нулю. Элементарная информация $J_A(B_j)$ становится отрицательной, если вероятность состояния A_i после получения сигнала B_j уменьшается. В выражении (3.9) величина $J_A(B)$ представляется как результат усреднения по информации, содержащейся в системе контроля B относительно каждого из состояний объекта A . Существует и другой путь усреднения на основе введения понятия об информации, которой обладает состояние B относительно объекта A :

$$J_A(B) = \sum_{j=1}^m P(B_j) \cdot J_A(B_j), \quad (3.17)$$

где

$$J_A(B_j) = \sum_{i=1}^m P(A_i/B_j) \cdot \log \left[\frac{P(A_i/B_j)}{P(A_i)} \right]. \quad (3.18)$$

Существенность или значимость параметров контроля также определяется по количеству информации, которое можно получить с их помощью.

Рассмотренные информационные подходы не предусматривают обратной связи со структурными параметрами объекта. Предлагаемые информационные показатели не позволяют оценить уровень работоспособности объекта, т.к. характеризуют только количество информации, получаемой при контроле безотносительно к текущему состоянию объекта. Здесь важную роль играет изменчивость диагностических признаков, реагирующих на множество возможных состояний. Решающим действием при назначении диагностических проверок является выделение более значимой информации из числа многофакторного диагностического анализа. На этом этапе ценность обследования определяется мерой вероятности данного состояния, а не вероятностью отказа, по контролируемому параметру. Кроме того определение вероятностей $P(A_i)$, $P(B/A_i)$, $P(A_s)$, $P(B/A_s)$ с учетом особенностей эксплуатации и конструкции при диагностировании объектов АТ представляет некоторую сложность, т.к. предполагает использование статистических данных по многим ЛА и АД. Необходимо отметить, что для реализации рассмотренных подходов следует разбить пространство возможных состояний АТ на некоторую детерминированную

совокупность, что в принципе представляется возможным при изменении технического состояния АТ и соответствующих параметров.

Результатом сравнительного анализа методов диагностики АТ, в основе которого положены известные подходы к теории узнавания, а также экспертные оценки с учетом накопленных многолетних статистических данных и обобщенного опыта эксплуатации, является иерархическая структура информативности методов (табл.3.1). Ранее была произведена оценка взаимосвязи – «информативность-метод» по 10-ти бальной шкале.

Таблица 3.1.

**Иерархическая структура и экспертная оценка
информативности основных методов диагностики АТ**

№	Методы диагностики ГТД	Экспертная оценка (max – 10 баллов)
<u>Инструментальные</u>		
1.	Тепловизионный (инфракрасная термография)	9,5
2.	Трибомониторинг (анализ проб авиамасел)	8,5
3.	Эндоскопия (фото-видео документирование)	8,0
4.	Виброакустический	7,5
5.	Термогазодинамическая параметрия	6,0
6.	Неразрушающий контроль (кроме теплового)	6,0
<u>Аналитические</u>		
7.	Классификационные	7,0
8.	Статистических решений	6,0
9.	Прогностические	5,5

Учитывалось количество безошибочно поставленных диагнозов («попадание в цель») по результатам применения рассмотренных выше методов, на основе которых и производилась экспертная рейтинговая оценка. Так как получаемая информация формировалась от различного объема выборок, каких-либо количественных

характеристик, позволяющих с математической точностью оценить весомость каждого из методов (в табл. не приводится).

3.4. Требования к информационному критерию технического состояния АТ

В разделе 3.3 был проведен анализ существующих подходов к обобщенной оценке состояния технических систем. На основе проведенного анализа применительно к объектам АТ необходимо учесть следующие требования, предъявляемые к информационному критерию (табл.2.2):

1. Информационный критерий (ИК) должен максимально характеризовать систему диагностических признаков АТ, т.е. соответствовать изменчивости и реагировать на возможные состояния, определяемых нормативно-технической документацией. При оценке качества АТ первостепенный интерес с точки зрения эксплуатанта представляет его работоспособность, поэтому информационный критерий должен отражать именно эту сторону качества.

2. Информационный критерий должен быть критичен по отношению к каждому из контролируемых диагностических параметров. Изменение уровня работоспособности элементов АТ должно характеризоваться изменением величины ИК и хотя бы одного из диагностических параметров контроля. С другой стороны, в ИК не должны включаться такие диагностические параметры, изменение которых не отражало бы изменение уровня работоспособности ГТД.

3. Информационный критерий и диагностические параметры должны иметь физический смысл, быть связанными функционально со структурными параметрами АТ и иметь количественную оценку.

4. Информационный критерий - однозначно отражать степень изменчивости состояния АТ и проявление отказа по любому из контролируемых параметров.

5. Характер изменения ИК в процессе эксплуатации ЛА и АД - быть необратимым. Это может позволить прогнозировать сроки очередного контроля и прекращения эксплуатации АТ.

6. Информационный критерий должен позволять оценивать состояние ЛА и АД применительно к используемым средствам и методам контроля. При этом - позволять сравнивать эффективность различных систем контроля. В качестве критерия эффективности целесообразно использовать информативность контроля.

7. Информационный критерий - быть пригодным для использования в качестве составляющих частных параметров любой размерности и физической природы. При этом частные параметры должны использоваться без назначения недостаточно обоснованных весовых коэффициентов.

8. Информационный критерий должен характеризовать уровень работоспособности ЛА и АД на всех этапах их эксплуатации.

При оценке возможности реализации требований к ИК целесообразно рассматривать для удобства классификации множество возможных состояний АТ, как пространство этих состояний. В этом случае каждому классу можно поставить в соответствие определенный уровень работоспособности АТ, вплоть до критического уровня. Поскольку информационный критерий представляет собой некоторую композицию частных параметров контроля, то он должен однозначно отражать принадлежность двигателя тому или иному классу состояний. Одному и тому же численному значению ИК могут соответствовать различные состояния, принадлежащие одному классу. Количество состояний в классе определяется количеством контролируемых частных параметров и может служить косвенной характеристикой информативности применяемой системы контроля. Изменение уровня работоспособности ЛА и АД представляет собой непрерывный процесс перехода объектов АТ из одного класса состояний в другое. Задавшись допусковым значением частных параметров можно определить предельно допустимый уровень

работоспособности, как критический класс состояний. И, наконец, ИК должен отражать переход диагностируемого объекта от одного класса состояний к другому вплоть до критического.

Контрольные вопросы к 3-ей главе

1. Охарактеризуйте методы оперативной диагностики АТ с позиций информативности.
2. Какие существуют ограничения при выборе и использовании методов диагностики авиационных ГТД?
3. Выделите перспективные методы технической диагностики применительно к эксплуатации АТ.
4. Объясните, что понимается под терминами трибодиагностика, сцинтилляция?
5. Преимущества и недостатки методов трибодиагностики.
6. Что является диагностическими признаками определения технического состояния авиационного ГТД?
7. Как определить количество информации, характеризующей уровень работоспособности объекта АТ при его контроле?
8. Какие требования предъявляются при выборе информационного критерия оценки технического состояния АТ?

Глава 4. Теория информации в решении классификационных задач технической диагностики

4.1. Задачи постановки диагноза

Диагностика, в целом, объединяет большой круг задач современной техники, медицины, геофизики и других прикладных областей. В этих задачах общим является необходимость оценить неизвестное состояние некоторого объекта диагностики по результатам косвенных измерений, которые зачастую имеют не детерминированную, а лишь статистическую связь с неизвестным состоянием объекта. Эта особенность позволяет широко использовать для оптимизации диагностического процесса методы теории вероятностей и математической статистики [30,36].

Как уже было подробно рассмотрено выше, многокомпонентная диагностическая информация используется для оценки работоспособности АТ, а также для прогнозирования ее дальнейшего состояния. Техническая диагностика тесно связана с проблемой надежности, которая доказывает, что отказы функциональных узлов АТ являются случайными событиями, т.е. их характер и момент появления не связаны однозначно с какими-либо контролируруемыми внешними факторами, и их закономерности нуждаются в вероятностном рассмотрении. Состояние АТ в некоторый момент времени t не определяется однозначно значением t , а зависит от сочетания многочисленных обстоятельств, складывающихся как в процессе изготовления и ремонта ЛА и АД, так и в процессе их эксплуатации. Каждому моменту времени соответствует не одно, а целое множество возможных состояний, в одном из которых может находиться объект диагностики. Это множество представляет собой совокупность физических возможностей, из которых в действительности реализуется только одна.

Современная теория надежности различает в любой технической системе обычно два класса состояний: «система исправна», «система неисправна» и изучает распределение вероятностей этих состояний для различных узлов и агрегатов АТ, а также условий, в которых они находятся.

Для каждого из этих двух классов состояний можно установить несколько градаций, т.е. разбить их на подклассы. Так, класс состояний неисправности можно подразделить на подклассы в зависимости от того, какой элемент объекта неисправен. В свою очередь, класс исправных состояний можно подразделить на подклассы, например, по времени, в течение которого можно гарантировать, что узел или агрегат, находящийся в данном состоянии, будет исправным в течение T часов с вероятностью $P(T)$ (с упреждающим допуском) [37].

Каждому классу состояний W_i ($i=1,2,\dots,r$) можно поставить в соответствие вероятность P_i того, что состояние механизма в рассматриваемый момент времени t будет принадлежать этому классу. Эти вероятности проявляются при многократном диагнозе механизмов данного вида и характеризуют частоту обнаружения при этом состоянии класса W_i

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

Зная вероятность P_i , можно оценить неопределенность состояния в момент t , воспользовавшись определением энтропии [14]

$$H(W) = - \sum_{i=1}^n P_i \lg P_i. \quad (4.1)$$

При диагнозе состояний ЛА и АД анализируются некоторые внешние признаки и сопровождающие процессы. Каждый признак можно рассматривать в качестве симптома того или иного состояния, так как с некоторыми состояниями АТ он совместим, с другими - нет. После обнаружения некоторого признака V_j вероятности состояний P_i останутся прежними, если этот признак не несет информации о состоянии объекта, или изменятся, причем в этом случае энтропия $H\left(\frac{W}{V_j}\right)$, т.е. неопределенность состояния уменьшится.

Симптом можно оценить количеством информации $J(V_j)$, которую он доставляет о технической системе:

$$J(V_j) = H(W) - H\left(\frac{W}{V_j}\right),$$

где $H\left(\frac{W}{V_j}\right)$ - энтропия состояния ГТД после обнаружения признака V_j .

Существуют методы проверки статистических гипотез [4] (минимального риска, минимального числа ошибочных решений, наибольшего правдоподобия, метод итераций (минимакса), Неймана-Пирсона, Байеса), которые позволяют на основании известных распределений вероятностей состояний технических систем и условных вероятностей появления того или иного признака при различных состояниях оценить достоверность предположения о том, что объект диагностики находится в состоянии W_i [37], при этом необходима достоверная и достаточная статистическая база. Под статистическими методами диагностики понимаются методы, позволяющие стохастически организовать оптимальное управление процессами диагностирования.

Практика использования статистической диагностики в авиатехнике и в других отраслях привела к одному общему выводу - ее эффективность прямо пропорциональна знанию указанных функций распределения вероятностей тех случайных величин, которые и делают диагностический процесс случайным (распределение неисправностей, результатов проверок и т.д.). Это привело к постановке задач об адаптации системы технической диагностики, к реальной статистической структуре диагностических данных.

Естественно, что процессы диагностирования должны определенным образом оптимизироваться. Действительно, если эти процессы затянутся, то перейти на статистическую диагностику можно будет лишь в конце жизненного цикла объекта. Ясно, что в этом случае получаемая выгода будет минимальной. Вместе с тем, если переход на статистические методы будет преждевременным, это так же не даст большого выигрыша, а иногда может привести к излишним потерям. Если диагностическая выборка слишком мала, то и достоверность оценки распределения будет недостаточной. Поэтому и статистическая оптимизация процесса диагностики по такой оценке не будет эффективной.

Необходимо отметить, что оценка статистического распределения включает оценку его вида и оценку соответствующих параметров. Первая задача решается методами непараметрической статистики. Вторая - использует две разновидности методов — байесовские и не байесовские подходы. Учитывая опыт эксплуатации однотипных объектов, можно составить определенное мнение о семействах тех распределений, которые встречаются в задачах постановки диагноза. Как правило, это экспоненциальные семейства. Тем не менее, конкретное значение их параметров для объекта конкретного типа остается зачастую неизвестным. Именно поэтому задача оценки неизвестного, распределения истории диагноза (генез), в первую очередь является задачей оценки параметров этого распределения. Тем не менее, необходимо обобщить некоторые виды непрерывных распределений, что даст возможность решать параметрическими методами и ряд непараметрических задач.

До тех пор, пока не получена оценка для неизвестного параметра в истории диагноза, нельзя статистически оптимизировать алгоритмы диагностики. С одной стороны, хотелось бы такую оценку получить как можно быстро, с другой — наиболее точно. Эти противоречивые требования создают основу для введения такого критерия оптимизации процессов диагностирования, который бы учитывал как нарастание траекторных потерь на сбор диагностической информации в виде историй диагноза, так и ожидаемое значение степени риска от перехода на статистические методы диагностики.

Задача перехода на статистические методы диагностики требует также решения целого ряда организационно-методических вопросов, таких, как разумный выбор и нормирование траекторией и степени риска составляющих критерия оптимизации, определение рамок самого объекта диагностирования и его контролируемых величин, определение возможности перехода на статистическую оценку технического состояния этого объекта и т.д. Для решения этих вопросов необходимо учесть информационный аспект при выборе совокупности контролируемых параметров (методов) объектов АТ.

В общем виде информация определена сведениями о физической системе (объекте), явлении, событии, являющейся объектом хранения, передачи и преобразования. Поскольку цель технической диагностики – с наименьшими затратами получать сведения о действительном состоянии объектов, необходимо иметь информационную оценку процессов диагностирования. При этом исходят из следующих положений. Как уже отмечалось, перед началом оценки работоспособности объекта существует полная неопределенность в суждении о состоянии объекта. Осуществление проверки каждого показателя уменьшает степень неопределенности в силу получения информации о состоянии объекта. Оценив объем информации, который несет каждый показатель, можно определить оптимальную совокупность методов оценки действительного состояния объекта. Здесь следует учитывать два аспекта:

- вес каждого из показателей, при этом назначать наибольший вес тому показателю, который является наиболее зависимым от изменений, происходящих в объекте;
- техническую реализацию объекта, т. е. тип элементов и структуру объекта.

С этой точки зрения объект может характеризоваться вероятностью безотказной работы элементов, узлов, блоков или устройств, определяющих формирование показателей.

Диагноз основывается не только на статистике, но и на предположении, что техническая система является детерминированной, т.е. каждому состоянию системы соответствуют вполне определенные внешние

проявления и, наоборот, каждому диагностическому сигналу соответствует вполне определенное техническое состояние системы.

Возможны и другие, более сложные зависимости, однако любое изменение параметра по времени может быть представлено в виде комбинации основных закономерностей (тренд, скачок, выброс, разброс), и дальнейшее усложнение моделей ничего не прибавляет в смысле их связи с техническим состоянием объекта.

Простейший способ использования тенденций изменения параметра диагностирования по наработке — визуальное сравнение получаемых в процессе эксплуатации графиков с эталонными кривыми, построенными для данного типа двигателя. Не следует недооценивать эффективность такого подхода. Однако его успешность определяется точностью ручной регистрации параметра, наличием достаточно подготовленного технического персонала, а также организацией всего процесса сбора, ручной обработки и систематизации информации, исходящей от большого числа разнообразных объектов эксплуатации.

Описание процесса изменения параметра в среднем не может дать удовлетворительного диагноза, так как большую важность приобретает оценка тенденции изменения параметра в данный момент. Поэтому модель прогнозирования должна быть наделена свойствами учета происходящих изменений, т.е. адаптивными свойствами. В этом случае модель «самонастраивается», учитывает диагностический вес новой информации, исключая устаревшие данные.

Очевидно, что с увеличением числа контролируемых параметров более полно будет отражено текущее состояние объекта, но, с другой стороны, для отслеживания большого объема параметров измерительная аппаратура должна отвечать повышенным требованиям, что неминуемо приводит к ее удорожанию.

Вместе с тем, поскольку не все параметры ЛА и АД имеют одинаковую информативность, большое практическое значение приобретает задача выявления тех из них, которые должны включаться в процедуру контроля в первую очередь.

4.2. Множество возможных состояний ЛА и АД

В процессе эксплуатации, а также при изготовлении и ремонте АТ, некоторые ее физические свойства могут изменяться. Одним из основных понятий теории технического

диагноза является понятие - состояние рассматриваемого объекта. Под состоянием будем подразумевать набор вещественных чисел (параметров состояния) x_1, x_2, \dots, x_n , характеризующих существенные свойства узлов ФС АТ и способы их соединения друг с другом в рассматриваемый момент времени t .

Состояние объекта будет определено, если станет известно значение каждого параметра x_1, x_2, \dots, x_n . Это и составляет задачу диагноза. Совокупность параметров, определяющих состояние АТ, должна отвечать следующим условиям:

1. Каждый параметр x_i может изменяться независимо от изменения параметров x_j ($i \neq j$). Под независимостью в этом случае следует понимать следующее. Например, изменение радиальных зазоров всех подшипников валов ГТД, вообще говоря, зависит от времени его работы, и в этом смысле величина зазора каждого подшипника некоторым образом связана с зазорами других подшипников. Но, если принять во внимание, что эта связь не однозначна, так как износ одной детали может существенным образом отличаться от износа других, а также, если допустить возможность замены одного подшипника без замены других, то следует признать, что зазоры подшипников как параметры состояния являются независимыми величинами. Будем считать параметры состояния независимыми в том случае, если не существует функции, которая позволяла бы однозначно определять параметр x_i по известным значениям других параметров этой совокупности. Так, если в число параметров состояния износа подшипникового узла ГТД включены посадочный диаметр вала d , внутренний диаметр подшипника D и установочный зазор S между валом и подшипником, то эти параметры нельзя считать независимыми, поскольку, зная два из них, всегда можно определить и третий, воспользовавшись элементарной формулой $S = D - d$.

Система независимых параметров минимальна, потому что она не содержит избыточных параметров, введение которых не прибавляет дополнительной информации о состоянии объекта диагностики.

2. Совокупность параметров состояния x_1, x_2, \dots, x_n должна быть полной, т.е. помимо этих величин в ФС АТ не должно существовать других независимых параметров, определение которых входит в диагностическую задачу и их изменение приводит к существенной вариации диагностической информации.

Требование полноты информации от системы параметров технического состояния эквивалентно требованию равенства числа параметров, принятых для описания состояния, числу степеней свободы исследуемого объекта. Как известно [2,25], попытка описания состояния системы конечным набором параметров приводит к идеализации, более или менее согласующейся с действительностью. Это обстоятельство проявляется и при решении диагностических задач. Неполное описание технического состояния АТ диагностическими параметрами – одно из основных источников ошибок (помех) при постановке диагноза. При решении вопроса о включении того или иного параметра ЛА и АД в совокупность диагностических параметров необходимо учитывать два вида обстоятельств:

1. Некоторые диагностические параметры ФС, как искомые переменные, могут непосредственно входить в формулировку диагностической задачи. Например, могут быть поставлены задачи - обеспечить определение зазоров в подшипниках, угла перекоса зацепления шлицевой пары, давления и угла впрыска топлива форсункой камеры сгорания, величины подачи топлива и т.д. Эти величины, безусловно, следует считать диагностическими параметрами технического состояния ГТД.

2. При разработке системы диагностики, когда уже выбраны физические процессы, которые будут использоваться в качестве информационного диагностического сигнала, следует рассмотреть другие диагностические параметры технического состояния АТ с

точки зрения их влияния на параметры первичного диагностического сигнала. Если изменение какого-либо параметра состояния не приводит к существенному изменению параметров диагностического сигнала, то поставленную задачу следует считать неразрешимой. Необходимо или изменить задачу, или использовать для диагностики другой информационный диагностический сигнал, зависимость которого от всех параметров состояния более ярко выражена и поддается контролю имеющимися техническими средствами.

Однако может встретиться и противоположный случай, когда число диагностических параметров, от которых существенно зависит итоговая информация, больше числа параметров, подлежащих определению в данной диагностической задаче. Эти дополнительные величины должны быть также включены в число параметров определения состояния. Так, при виброакустической диагностике необходимо считать существенными все параметры ГТД, изменение которых приводит к изменению силовых взаимодействий между деталями (зазоры в трущихся парах, эрозионный износ лопаток компрессора, разбандаживания полок рабочих лопаток компрессора низкого давления (КНД), попадание посторонних предметов во входное устройство и т.д.). Это обстоятельство будет учтено на примере решения конкретной диагностической задачи в последующем разделе пособия.

Одним из преимуществ рассматриваемой информационной диагностики следует считать то, что силовые взаимодействия (деформации и напряжения в деталях) являются существенными с точки зрения работоспособности АТ, а поэтому нуждающиеся в количественном определении.

Совокупность x, y, z можно рассматривать как вектор, заданный в трехмерном пространстве, а сами числа, как проекции вектора на координатные оси. По аналогии, совокупность n чисел x_1, x_2, \dots, x_n рассматривается как вектор n -мерного пространства состояний. Техническое состояние АТ будем обозначать W или (x_1, x_2, \dots, x_n) .

Возникает вопрос о структуре векторного пространства состояний АТ, т.е. о взаимосвязи ее элементов. Для этого пространства справедливы операции сложения векторов, умножения их на число, а также другие линейные операции, сводящиеся к соответствующим операциям над компонентами векторов [7]:

$$\left. \begin{aligned} W &= W' + W'' = (x'_1 + x''_1, x'_2 + x''_2, x'_n + x''_n) \\ W &= aW' = (ax_1, ax_2, \dots, ax_n) \end{aligned} \right\} ,$$

где a – постоянное число; x'_i и x''_i – соответственно компоненты векторов W' и W'' .

Пусть $W = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – состояние ГТД в некоторый момент времени t , а в момент времени $t + \Delta t$ пусть оно определяется вектором $W + \Delta W = (x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n)$, тогда производная

$$\frac{dW}{dt} = \left(\frac{\Delta x_1}{\Delta t}, \frac{\Delta x_2}{\Delta t}, \dots, \frac{\Delta x_n}{\Delta t} \right)$$

будет характеризовать скорость изменения состояния АТ в момент времени t , а интеграл (4.2) укажет состояние, в котором будет находиться объект диагностики в момент t , если в начальный момент $t = 0$ он был в состоянии W_0 .

$$W(t) - W_0 = \int_0^t W dt = \left(\int_0^t x_1 dt, \int_0^t x_2 dt, \dots, \int_0^t x_n dt \right). \quad (4.2)$$

Исходя из физических соображений, очевидно, что пространство состояний непрерывно и всюду плотно, так, меняя одно состояние на другое, технический объект всегда проходит через бесконечное число промежуточных состояний.

Специфика диагностических задач требует установления в пространстве состояний отношения порядка между его элементами. Это вызвано тем, что различные состояния АТ не равноценны с точки зрения потребителя диагностической информации.

Свойство упорядоченности множества состоит в том, что любая пара его элементов W' и W'' находится в отношении, подчиняющемся следующим условиям:

а) для элементов W' и W'' возможны только три соотношения порядка: или $|W' \langle |W''|$, или $|W' \rangle |W''|$, или $|W'| = |W''|$;

б) если $|W' \langle |W''|$ и $|W''' \rangle |W''|$, то $|W' \langle |W'''|$, где $|W'''|$ - некоторая числовая характеристика вектора W .

Чтобы упорядочить множество возможных состояний, необходимо задать на нем некоторые числовые функции, соответствующие понятиям длины вектора и угла между векторами обычного трехмерного пространства [2,47].

Введенное понятие длины вектора состояния довольно абстрактно, но при разработке конкретной системы диагностики ему может быть придан более ясный физический смысл. Например, каждому состоянию авиадвигателя W можно поставить в соответствие положительное число t_w , в течение которого он с вероятностью $P(D)$ будет исправным. Можно задаться временем T и каждому состоянию W поставить в соответствие вероятность P_w , т.о. двигатель, находящийся в состоянии W будет исправен в течение времени T . Нетрудно убедиться, что введенные функции состояния t_w и P_w удовлетворяют условиям, определяющим понятие расстояния.

4.3. Параметрическая классификация объекта диагностики на примере двигателя ПС-90А

Задача повышения достоверности диагностирования объектов АТ всегда остается актуальной в силу случайной природы системы признаков и системы состояний. Организация достоверного диагностирования объектов АТ осложняется необходимостью включения в процедуру диагностирования значительного числа разнородных физических величин (признаков и их параметров), отражающих поведение и взаимодействие различных подсистем узлов и элементов АТ. Переход объекта АТ из одного состояния в другое сопровождается изменением целого ряда признаков, которые необходимо обрабатывать комплексно.

Следует отметить, что на этом этапе важное значение имеет параметрическая диагностика, которая включает в себя часть методов, изложенных в предыдущих главах. Однако параметрическая диагностика эффективна в основном на определенных промежутках полета, результатом которой является сигнализация отказа или отклонение какого-либо параметра в текущий момент времени. Например, отличительной особенностью признаков отказов системы автоматического управления (САУ) ГТД является то, что многие из них носят стохастический характер, т.е. проявляются в сочетании со случайными сигналами с забросом по амплитуде [32]. В силу этого результаты измерений контролируемых параметров имеют существенный разброс. В частности такой характер имеют признаки потери газодинамической устойчивости ГТД, что вносит неопределенность в контроль газодинамического состояния двигателя и приводит к ошибкам диагностирования.

Сегодня параметрическая диагностика получила широкое распространение [33], так как количество диагностируемых элементов на современных двигателях постоянно растет. Например, на ГТД ПС-90А одновременно обрабатывается 249 бинарных и 33 аналоговых параметров, и по данным системы БСКД (при определенном сочетании признаков) возможно осуществлять приемлемую постановку диагноза [28]. Однако такое количество информации можно трактовать неоднозначно, что способствует возникновению ошибок первого и второго рода, поэтому необходимо выделить значимые информационно-емкие признаки.

В этих условиях построение эффективных алгоритмов диагностирования оказывается возможным лишь на основе использования статистических моделей, отражающих поведение объекта в различных, в том числе отказных состояниях. При этом формирование диагноза сводится к отнесению фактического состояния объекта к одному из нескольких (возможных) классов, перечень которых фиксируется заранее [36].

Каждый из классов характеризуется собственным эталоном, которому присущи усредненные по параметрам признаки. Геометрически любому конкретному объекту соответствует некоторая точка в N-мерном пространстве признаков, а разделение эталонов означает построение в этом пространстве так называемых разделяющих гиперповерхностей, устанавливающих границы между классами на основе правила решения. Поскольку не все контролируемые параметры ГТД имеют одинаковую информационную ценность, то большое практическое значение приобретает задача ранжирования этих параметров – выявление таких из общего числа, которые должны включаться в процедуру контроля в первую очередь.

На первом этапе необходимо сформировать номенклатуру диагностических признаков, пригодных для целей диагностирования. Здесь существуют несколько методов [6,38]:

Метод малых отклонений. По уравнениям, связывающим основные характеристики объекта и его контролируемые параметры (диагностические признаки), находятся коэффициенты влияния указанных параметров на показатели качества объекта. Те параметры, которые имеют наибольшие коэффициенты влияния, признаются наиболее информативными.

Метод факторного анализа. По результатам многофакторного эксперимента определяется связь обобщенного показателя качества объекта с его контролируемыми параметрами, после чего производится оценка значимости коэффициентов полученной функциональной зависимости.

Метод математического моделирования или полунатурных испытаний объекта. Исследования объекта производится на аналоговой или цифровой модели, с детализированной точностью до предварительно названной совокупности параметров. В результате проведения серии экспериментов, связанной с имитацией серией характерных отказов, определяются признаки объекта, наиболее критичные к изменению его состояния.

Метод экспертных оценок. Перечень контролируемых параметров объекта устанавливается с учетом мнений определенного числа экспертов-специалистов в данной области.

Методы оптимизации набора контролируемых параметров. С помощью методов, входящих в данную группу, обеспечивается выбор такого набора параметров, который дает возможность оценить экстремум принятого критерия оптимальности (максимум количества получаемой информации, минимум среднего риска и т.д.).

Рассмотрим подробнее методы оптимизации набора контролируемых параметров как наиболее пригодные к практическому использованию.

Будем полагать, что имеется определенная совокупность диагностических признаков K_1, K_2, \dots, K_{n_0} , которые характеризуют возможные состояния объекта. Объект в произвольный момент может находиться либо в исправном состоянии D_0 с вероятностью P_0 , либо в любом из отказных состояний D_1, D_2, \dots, D_r с соответствующими вероятностями. Влияния отказов различных элементов объекта осуществляется с помощью матрицы состояний $W = \|W_{ij}\|_{n_0 \times (r+1)}$, число строк которой равно общему количеству признаков, а число столбцов – количеству возможных состояний объекта. При этом $W_{ij} = 1$, если параметр d_k принимает допустимые значения состояния D_j и $W_{ij} = 0$ – в противном случае. Обычно возникает задача выбора такого ограниченного набора из N признаков диагностирования, с помощью которых дается приемлемое количество информации о состояниях объекта. Для решения этой задачи воспользуемся подходом [36].

Сначала вычисляем полную информационную энтропию К.Шеннона

$$H_0 = -\sum_{j=0}^r P(D_j) \cdot \ln P(D_j). \quad (4.3)$$

Регистрация каждой реализации признака снижает энтропию, т.к. несет информацию о состоянии объекта. Среднюю условную энтропию объекта после регистрации можно найти так:

$$H_i(d_{K_i}) = P(d_{K_i}) \cdot H(d_{K_i}) + P(\bar{d}_{K_i}) \cdot H(\bar{d}_{K_i}), \quad (4.4)$$

где $P(d_{K_i})$ и $P(\bar{d}_{K_i})$ – соответственно вероятности получения результатов «в норме» и «не в норме», $H(d_{K_i})$ и $H(\bar{d}_{K_i})$ – соответствующие данным результатам условные энтропии. Используя матрицу состояний, можно найти:

$$P(d_{K_i}) = \sum_{j \in \Omega_i} P(D_j); \quad P(\bar{d}_{K_i}) = \sum_{j \in \bar{\Omega}_i} P(D_j), \quad (4.5)$$

где $\Omega_i = [j : W_{ij} = 0]$ - множество индексов, составленное из номеров столбцов j , имеющих символы 0 на пересечении с i -ой строкой матрицы W . Энтропия состояния объекта после проведения диагностирования по признаку рассчитывается как:

$$H(K_i) = - \sum_{j \in \Omega_i} P(D_j / K_i) \ln P(D_j / K_i); \quad (4.6)$$

$$H(\bar{K}_i) = - \sum_{j \in \bar{\Omega}_i} P(D_j / \bar{K}_i) \ln P(D_j / \bar{K}_i),$$

где $\sum_{j \in \Omega_i} P(D_j / K_i)$ и $\sum_{j \in \bar{\Omega}_i} P(D_j / \bar{K}_i)$ - условные вероятности, соответствующие различным результатам диагностирования по признаку K_i ; определяются по формулам Байеса [8]:

$$P(D_j / K_i) = \frac{P(D_j)}{\sum_{j \in \Omega_i} P(D_j)}; \quad (4.7)$$

$$P(D_j / \bar{K}_i) = \frac{P(D_j)}{\sum_{j \in \bar{\Omega}_i} P(D_j)}.$$

Подставляя (4.6), (4.7) в (4.4), находим количество информации, полученное в результате диагностирования объекта по признаку K_i :

$$I(K_i) = H_0 - H_i(K_i). \quad (4.8)$$

Выполнив аналогичные расчеты для всех конкурирующих признаков K_i ($i=1, 2, \dots, n_0$), нетрудно выбрать признак с максимально полезной информацией, контроль которого должен осуществляться в первую очередь.

Следующим по порядку проверяется признак K_m , обеспечивающий максимум условной информации относительно нового состояния объекта с

энтропией H_{il} и т.д. Таким образом, условная энтропия $H_{il}(K_i/K_l)$ будет равна

$$H_{il}(K_i/K_l) = P(K_i/K_l) \cdot H(K_i/K_l) + P(\bar{K}_i/K_l) \cdot H(\bar{K}_i/K_l) + P(K_i/\bar{K}_l) \cdot H(K_i/\bar{K}_l) + P(\bar{K}_i/\bar{K}_l) \cdot H(\bar{K}_i/\bar{K}_l), \quad (4.9)$$

где $P(K_i/K_l)$ и $P(\bar{K}_i/K_l)$ - соответственно условные вероятности того, что признак K_i находится в пределах своего поля допуска, либо не в этих пределах, если ранее зарегистрированный признак K_l - «в норме»; $P(K_i/\bar{K}_l)$ и $P(\bar{K}_i/\bar{K}_l)$ - условные вероятности нахождения K_i в заданных пределах. При этом для всех $i \neq l$:

$$\begin{aligned} P(K_i/K_l) &= \sum_{j \in (\Omega_i \cap \Omega_l)} P(D_j/K_l); & P(\bar{K}_i/K_l) &= \sum_{j \in (\Omega_i \cap \bar{\Omega}_l)} P(D_j/K_l); \\ P(K_i/\bar{K}_l) &= \sum_{j \in (\Omega_i \cap \bar{\Omega}_l)} P(D_j/\bar{K}_l); & P(\bar{K}_i/\bar{K}_l) &= \sum_{j \in (\bar{\Omega}_i \cap \bar{\Omega}_l)} P(D_j/\bar{K}_l); \\ H(K_i/K_l) &= - \sum_{j \in (\Omega_i \cap \Omega_l)} P(D_j/K_i, K_l) \ln P(D_j/K_i, K_l); \\ H(\bar{K}_i/K_l) &= - \sum_{j \in (\Omega_i \cap \bar{\Omega}_l)} P(D_j/\bar{K}_i, K_l) \ln P(D_j/\bar{K}_i, K_l); \\ H(K_i/\bar{K}_l) &= - \sum_{j \in (\Omega_i \cap \bar{\Omega}_l)} P(D_j/K_i, \bar{K}_l) \ln P(D_j/K_i, \bar{K}_l); \\ H(\bar{K}_i/\bar{K}_l) &= - \sum_{j \in (\bar{\Omega}_i \cap \bar{\Omega}_l)} P(D_j/\bar{K}_i, \bar{K}_l) \ln P(D_j/\bar{K}_i, \bar{K}_l). \end{aligned} \quad (4.10)$$

Количество информации, полученное в результате регистрации признака K_i ($i \neq 1$) относительно состояния, возникшего после диагностирования по признаку K_l , определяется как

$$I(K_i/K_l) = H_l(K_l) - H_{il}(K_i/K_l). \quad (4.11)$$

Анализируя, можно найти такой признак K_m , для которого

$$I(K_m/K_l) = \max I(K_i/K_l). \quad (4.12)$$

Выбор последующих признаков производится в соответствии с приведенной схемой до тех пор, пока число выбранных признаков станет равно числу возможных состояний. Рассмотрим это на конкретном примере.

авиадвигателя ПС-90А (самолеты Ил-96-300, Ту-204).

Исследуем диагностический признак «повышенная вибрация», признак сравнительно часто встречающийся в полете. Предварительно произведены исследования 69 двигателей, эксплуатировавшихся в авиапредприятиях ГА последние 5 лет (ЗАО «Домодедовские авиалинии», ОАО «Аэрофлот – Российские авиалинии», ОАО «Пермский моторный завод») и выбрано 6 «адресов». К этим «адресам» (диагнозам) относятся: повреждения от попадания посторонних предметов (ППП), разрушение задних опор, коробление и прогар камеры сгорания, возникновение и развитие трещин, обрыв лопаток, разбандажирование полок рабочих лопаток. Произведем необходимые расчеты условной энтропии К.Шеннона и информативности рассматриваемого признака, реагирующего на указанные состояния.

4.3.1. Расчет интенсивности отказов ГТД ПС-90А

Произведя обработку статистических данных по вибрациям, определяем зоны двигателя, наиболее подверженные вибрационным нагрузкам: вентилятор, компрессор низкого давления (КНД), компрессор высокого давления (КВД), задняя опора КНД, задняя опора КВД [26].

Ввиду того, что исходные вероятности состояний ГТД являются функциями времени, процедуру определения совокупности наиболее информативных признаков следует выполнить для нескольких значений t в интервале $(0; T_c)$, где T_c – время работы системы. Однако в тех случаях, когда T_c достаточно мало, и указанные вероятности на этом интервале меняются

незначительно, можно выполнить их осреднение:
$$P_j = \frac{1}{t} \int_0^t P_j(t) dt, j = 0, 1, \dots, r.$$

Вероятность отказа в каждой из подсистем подчиняется экспоненциальному закону, т.е.

$$P_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}, (i = 1, 2, \dots, 5). \quad (4.13)$$

Расчет интенсивности отказов, приведенных выше узлов, вычислим по известной формуле (4.14). Расчет $\lambda(t)$ представлен ниже в табл. 4.1-4.5.

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n_i}{(N_i - n_i(t))\Delta t_i}, \quad (4.14)$$

где Δn_i – число отказавших изделий в интервале Δt_i ;

N_i – число изделий, наблюдаемых в интервале Δt_i ;

$n_i(t)$ – число изделий, отказавших до начала i -го интервала наработки.

На практике при эксплуатации двигателей наиболее часто встречающиеся отказы вышеназванных узлов распределены неравномерно. Поэтому для расчета необходимо разделить рассматриваемый ресурс двигателя на три этапа. Здесь, как показал анализ, каждому этапу присущи свои отказы.

Таблица 4.1.

Вентилятор

Δt	Δn	$n(t)$	$\lambda(t)$
0-1000	4	0	0,00017391
1000-2000	0	4	0
2000-3000	5	4	0,00026316
3000-4000	4	9	0,00028571
4000-5000	0	13	0
5000-6000	4	13	0,0004

Таблица 4.2.

КНД

Δt	Δn	$n(t)$	$\lambda(t)$
0-1000	2	0	8,69565E-05

1000-2000	1	2	4,7619E-05
2000-3000	0	3	0
3000-4000	0	3	0
4000-5000	0	3	0
5000-6000	1	3	0,00005

Таблица 4.3.

КВД

Δt	Δn	$n(t)$	$\lambda(t)$
0-1000	0	0	0
1000-2000	0	0	0
2000-3000	0	0	0
3000-4000	1	0	4,34783E-05
4000-5000	2	1	9,09091E-05
5000-6000	1	3	0,00005

Таблица 4.4.

Задняя опора КНД

Δt	Δn	$n(t)$	$\lambda(t)$
0-1000	0	0	0
1000-2000	0	0	0
2000-3000	0	0	0
3000-4000	1	0	4,34783E-05
4000-5000	1	1	4,54545E-05
5000-6000	1	2	4,7619E-05

Таблица 4.5.

Задняя опора КВД

Δt	Δn	$n(t)$	$\lambda(t)$
0-1000	0	0	0
1000-2000	0	0	0
2000-3000	1	0	4,3478E-05

3000-4000	0	1	0
4000-5000	2	1	9,0909E-05
5000-6000	0	3	0

На этапе наработки от 0 до 2000 часов наиболее часто встречаются отказы узлов вентилятора и КНД, связанные с попаданием посторонних предметов во входное устройство двигателя и первые ступени КНД. Практическое отсутствие отказов других узлов на данном участке наработки объясняется отсутствием информационного массива, содержащего сведения о наработке двигателей рассматриваемого типа, связанных с относительно небольшим опытом эксплуатации на исследуемый период.

На этапе наработки от 2000 до 4000 часов к предыдущим узлам можно добавить отказы КВД и задних опор роторов КНД и КВД.

На заключительном этапе от 4000 до 6000 часов также проявляются все описанные выше отказы, но уже в более значимой степени.

4.3.2. Оценка средней условной энтропии на промежутке наработки от 0 до 6000 часов

Оценка средней условной энтропии на промежутке наработки от 0 до 2000 часов

Время работы двигателя 2000 часов. Двигатель может находиться в одном из трех состояний (D_0, D_1, D_2):

1. Все системы исправны (D_0).
2. Повреждение вентилятора ($D_1; \lambda_1 = \lambda_{\text{вент}} = 0,000087$).
3. Повреждение КНД ($D_2, \lambda_2 = \lambda_{\text{кнд}} = 0,000729$).

Определим среднее значение вероятностей реализаций каждого из состояний на интервале 0-2000 часов. Исходя из (4.13) имеем:

$$P_0 = \frac{1}{t(\lambda_1 + \lambda_2)} = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t},$$

$$P_0 = 0,804461 ;$$

$$P_1 = \frac{\frac{1 - e^{-(\lambda_2)t}}{\lambda_2} - \frac{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}}{\lambda_1 + \lambda_2}}{t},$$

$$P_1 = 0,142305;$$

$$P_2 = \frac{\frac{1 - e^{-(\lambda_1)t}}{\lambda_1} - \frac{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}}{\lambda_1 + \lambda_2}}{t},$$

$$P_2 = 0,051289;$$

Энтропия исходного состояния двигателя равна

$$H_0 = -(P_0 \ln(P_0) + P_1 \ln(P_1) + P_2 \ln(P_2)), \quad (4.15)$$

$$H_0 = 0,429806.$$

Допустим, что состояние двигателя может быть однозначно охарактеризовано значением шести признаков K_1, \dots, K_6 , оказывающих существенное влияние на вибрацию ГТД. Тогда матрица состояний будет иметь вид (табл. 4.6).

Матрица состояний

Таблица 4.6.

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

Средняя условная энтропия состояния двигателя при условии изменения признака K_1 будет равна:

$$H_{K_1} = (P_1 + P_2) \cdot \left(\left(-\frac{P_1}{P_1 + P_2} \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_1 + P_2}\right) \right) + \left(-\frac{P_2}{P_1 + P_2} \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1 + P_2}\right) \right) \right),$$

$$H_{K_1} = 0,111926.$$

Аналогично находим среднюю условную энтропию состояния двигателя при условии изменения признака K_2 :

$$H_{K_2} = 0,479773.$$

Средняя условная энтропия состояния двигателя при условии изменения признака K_4 :

$$H_{K_4} = (P_0 + P_1) \cdot \left(\left(-\frac{P_0}{P_0 + P_1} \cdot \ln\left(\frac{P_0}{P_0 + P_1}\right) \right) + \left(-\frac{P_1}{P_0 + P_1} \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_0 + P_1}\right) \right) \right),$$

$$H_{K_4} = 0,685304;$$

$$H_{K_6} = H_{K_1} = H_{K_3} = 0,111996; H_{K_5} = H_{K_4} = 0,685304.$$

Оценка средней условной энтропии на промежутке наработки от 0 до 4000 часов

Время работы двигателя 4000 часов. Двигатель может находиться в одном из шести состояний ($D_0, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$):

1. Все системы исправны (D_0).
2. Повреждение вентилятора ($D_1, \lambda_1 = \lambda_{\text{вент}} = 0,000241$).
3. Неисправность КНД ($D_2, \lambda_2 = \lambda_{\text{кнд}} = 0,000067288$).
4. Неисправность КВД ($D_3, \lambda_3 = \lambda_{\text{квд}} = 0,0000434783$).
5. Неисправность задней опоры КНД ($D_4, \lambda_4 = \lambda_{\text{зо}} = 0,0000434783$).
6. Неисправность задней опоры КВД ($D_5, \lambda_5 = \lambda_{\text{по}} = 0,0000434783$).

Определим среднее значение вероятностей каждого из состояний на интервале 0-4000 часов. Имеем:

$$P_0 = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5) \cdot t},$$

$$P_0 = 0,827874;$$

$$P_1 = \frac{1 - e^{-(\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)t}}{\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5} - \frac{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)t}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5},$$

$$P_1 = 0,219771;$$

$$P_2 = \frac{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)t}}{\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5} - \frac{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)t}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5},$$

$$P_2 = 0,049431;$$

$$P_3 = \frac{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_5)t}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_5} - \frac{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)t}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5},$$

$$P_3 = 0,031067;$$

$$P_4 = P_5 = P_3 = 0,031067. P_6 = P_1 = 0,219771.$$

Энтропия исходного состояния двигателя равна:

$$H_0 = - \left(\sum_{j=0}^6 P_j \ln(P_j) \right),$$

$$H_0 = 0,80519886.$$

Матрица состояний будет иметь вид (табл. 4.7):

Матрица состояний

Таблица 4.7.

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

Средняя условная энтропия двигателя при изменении признака K_1 равна:

$$\begin{aligned}
 H_{K_1} = & (P_0 + P_3 + P_4 + P_5) \cdot \left(-\frac{P_0}{P_0 + P_3 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_0}{P_0 + P_3 + P_4 + P_5}\right) \right) + \\
 & + \left(-\frac{P_3}{P_0 + P_3 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_3}{P_0 + P_3 + P_4 + P_5}\right) \right) + \\
 & + \left(-\frac{P_4}{P_0 + P_3 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_4}{P_0 + P_3 + P_4 + P_5}\right) \right) + \\
 & + \left(-\frac{P_5}{P_0 + P_3 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_5}{P_0 + P_3 + P_4 + P_5}\right) \right) + \\
 & + (P_1 + P_2) \left(-\frac{P_1}{P_1 + P_2} \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_1 + P_2}\right) \right) + \left(-\frac{P_2}{P_1 + P_2} \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1 + P_2}\right) \right)
 \end{aligned}$$

$$H_{K_1} = 0,532498.$$

Средняя условная энтропия двигателя при изменении признака K_2 равна:

$$\begin{aligned}
 H_{K_2} = & (P_0 + P_1 + P_2 + P_3) \cdot \left(-\frac{P_0}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_0}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3}\right) \right) + \\
 & + \left(-\frac{P_1}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3}\right) \right) + \\
 & + \left(-\frac{P_2}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3}\right) \right) + \\
 & + \left(-\frac{P_3}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_3}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3}\right) \right) + \\
 & + (P_4 + P_5) \left(-\frac{P_4}{P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_4}{P_4 + P_5}\right) \right) + \left(-\frac{P_5}{P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_5}{P_4 + P_5}\right) \right)
 \end{aligned}$$

$$H_{K_2} = 0,924718;$$

Средняя условная энтропия двигателя при изменении признака K_3 равна:

$$\begin{aligned}
 H_{K_3} = & (P_0 + P_4 + P_5) \cdot \left(-\frac{P_0}{P_0 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_0}{P_0 + P_4 + P_5}\right) \right) + \left(-\frac{P_4}{P_0 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_4}{P_0 + P_4 + P_5}\right) \right) + \\
 & + \left(-\frac{P_5}{P_0 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_5}{P_0 + P_4 + P_5}\right) \right) + (P_1 + P_2 + P_3) \left(-\frac{P_1}{P_1 + P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_1 + P_2 + P_3}\right) \right) + \\
 & + \left(-\frac{P_2}{P_1 + P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1 + P_2 + P_3}\right) \right) + \left(-\frac{P_3}{P_1 + P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_3}{P_1 + P_2 + P_3}\right) \right)
 \end{aligned}$$

$$H_{K_3} = 0,496568;$$

Средняя условная энтропия двигателя при изменении признака K_4 равна:

$$\begin{aligned} H_{K_4} = & (P_0 + P_1 + P_4 + P_5) \cdot \left(-\frac{P_0}{P_0 + P_1 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_0}{P_0 + P_1 + P_4 + P_5}\right) \right) + \\ & + \left(-\frac{P_1}{P_0 + P_1 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_0 + P_1 + P_4 + P_5}\right) \right) + \left(-\frac{P_4}{P_0 + P_1 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_4}{P_0 + P_1 + P_4 + P_5}\right) \right) \\ & + \left(-\frac{P_5}{P_0 + P_1 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_5}{P_0 + P_1 + P_4 + P_5}\right) \right) + (P_2 + P_3) \cdot \left(-\frac{P_2}{P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_2 + P_3}\right) \right) + \\ & + \left(-\frac{P_3}{P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_3}{P_2 + P_3}\right) \right) \end{aligned}$$

$$H_{K_4} = 0,874125.$$

$$H_{K_6} = H_{K_1} = 0,532498, \quad H_{K_5} = H_{K_4} = 0,874125.$$

Оценка средней условной энтропии на промежутке наработки от 0 до 6000 часов

Время работы двигателя 6000 часов. Двигатель может находиться в одном из шести состояний ($D_0, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$):

1. Все системы исправны (D_0).
2. Повреждение вентилятора ($D_1, \lambda_1 = \lambda_{\text{вент}} = 0,0000280696$).
3. Неисправность КНД ($D_2, \lambda_2 = \lambda_{\text{кнд}} = 0,0000615252$).
4. Неисправность КВД ($D_3, \lambda_3 = \lambda_{\text{квд}} = 0,0000614625$).
5. Неисправность задней опоры КНД ($D_4, \lambda_4 = \lambda_{\text{зо}} = 0,0000455173$).
6. Неисправность задней опоры КВД ($D_5, \lambda_5 = \lambda_{\text{по}} = 0,0000671937$).

Определим среднее значение вероятностей каждого из состояний на интервале 0-6000 часов. Имеем:

$$P_0 = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5) \cdot t},$$

$$P_0 = 0,794561754;$$

$$P_1 = \frac{1 - e^{-(\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)t}}{\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5} - \frac{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)t}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5},$$

$$P_1 = 0,0331438;$$

$$P_2 = \frac{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)t}}{\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5} - \frac{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)t}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5},$$

$$P_2 = 0,077139688;$$

$$P_3 = \frac{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_5)t}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_5} - \frac{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)t}}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5},$$

$$P_3 = 0,077052252;$$

$$P_4 = P_5 = P_6 = 0,077052252.$$

Энтропия исходного состояния двигателя равна:

$$H_0 = - \left(\sum_{j=0}^6 P_j \ln(P_j) \right),$$

$$H_0 = 0,878140122.$$

Матрица состояний будет иметь вид (табл. 4.8):

Матрица состояний

Таблица 4.8.

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

Средняя условная энтропия двигателя при изменении признака K₁ равна:

$$\begin{aligned}
H_{K_1} = & (P_0 + P_3 + P_4 + P_5) \cdot \left(\left(-\frac{P_0}{P_0 + P_3 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_0}{P_0 + P_3 + P_4 + P_5}\right) \right) \right) + \\
& + \left(-\frac{P_3}{P_0 + P_3 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_3}{P_0 + P_3 + P_4 + P_5}\right) \right) + \\
& + \left(-\frac{P_4}{P_0 + P_3 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_4}{P_0 + P_3 + P_4 + P_5}\right) \right) + \\
& + \left(-\frac{P_5}{P_0 + P_3 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_5}{P_0 + P_3 + P_4 + P_5}\right) \right) \right) + \\
& + (P_1 + P_2) \left(\left(-\frac{P_1}{P_1 + P_2} \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_1 + P_2}\right) \right) \right) + \left(-\frac{P_2}{P_1 + P_2} \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1 + P_2}\right) \right)
\end{aligned}$$

$$H_{K_1} = 0,829971756.$$

Средняя условная энтропия двигателя при изменении признака K_2 равна:

$$\begin{aligned}
H_{K_2} = & (P_0 + P_1 + P_2 + P_3) \cdot \left(\left(-\frac{P_0}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_0}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3}\right) \right) \right) + \\
& + \left(-\frac{P_1}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3}\right) \right) + \\
& + \left(-\frac{P_2}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3}\right) \right) + \\
& + \left(-\frac{P_3}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_3}{P_0 + P_1 + P_2 + P_3}\right) \right) \right) + \\
& + (P_4 + P_5) \left(\left(-\frac{P_4}{P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_4}{P_4 + P_5}\right) \right) \right) + \left(-\frac{P_5}{P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_5}{P_4 + P_5}\right) \right)
\end{aligned}$$

$$H_{K_2} = 0,767123151.$$

Средняя условная энтропия двигателя при изменении признака K_3 равна:

$$\begin{aligned}
H_{K_3} = & (P_0 + P_4 + P_5) \cdot \left(\left(-\frac{P_0}{P_0 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_0}{P_0 + P_4 + P_5}\right) \right) \right) + \left(-\frac{P_4}{P_0 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_4}{P_0 + P_4 + P_5}\right) \right) + \\
& + \left(-\frac{P_5}{P_0 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_5}{P_0 + P_4 + P_5}\right) \right) + (P_1 + P_2 + P_3) \left(\left(-\frac{P_1}{P_1 + P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_1 + P_2 + P_3}\right) \right) \right) + \\
& + \left(-\frac{P_2}{P_1 + P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1 + P_2 + P_3}\right) \right) + \left(-\frac{P_3}{P_1 + P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_3}{P_1 + P_2 + P_3}\right) \right)
\end{aligned}$$

$$H_{K_3} = 0,684379286.$$

Средняя условная энтропия двигателя при изменении признака K_4 равна:

$$\begin{aligned}
 H_{K_4} = & (P_0 + P_1 + P_4 + P_5) \cdot \left(-\frac{P_0}{P_0 + P_1 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_0}{P_0 + P_1 + P_4 + P_5}\right) \right) + \\
 & + \left(-\frac{P_1}{P_0 + P_1 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_0 + P_1 + P_4 + P_5}\right) \right) + \left(-\frac{P_4}{P_0 + P_1 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_4}{P_0 + P_1 + P_4 + P_5}\right) \right) \\
 & + \left(-\frac{P_5}{P_0 + P_1 + P_4 + P_5} \cdot \ln\left(\frac{P_5}{P_0 + P_1 + P_4 + P_5}\right) \right) + (P_2 + P_3) \cdot \left(-\frac{P_2}{P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_2 + P_3}\right) \right) + \\
 & + \left(-\frac{P_3}{P_2 + P_3} \cdot \ln\left(\frac{P_3}{P_2 + P_3}\right) \right) ;
 \end{aligned}$$

$$H_{K_4} = 0,741369731.$$

$$H_{K_6} = H_{K_1} = 0,829971756, H_{K_5} = H_{K_4}.$$

4.3.3. Результаты оценки количества и качества диагностической информации

Результаты расчета условной энтропии сведены в табл. 4.9.

Таблица 4.9.

Результаты расчета энтропии ПС-90А по признаку «повышенная вибрация»

Состояния (диагноз)	t=2000 ч	t=4000 ч	t=6000 ч
Попадание посторонних предметов во входное устройство двигателя и вентилятор	0,111926	0,532498	0,829972
Разрушение задних опор валов	0,479773	0,924718	0,767123
Коробление и прогары камеры сгорания	0,111926	0,496568	0,684379
Возникновение и развитие трещин на рабочих лопатках компрессора	0,685354	0,874125	0,74137
Обрыв лопаток компрессора	0,685354	0,874125	0,74137
Разбандажирования полок лопаток КНД	0,111926	0,532498	0,829972
H_0 Исходная энтропия	0,429806	0,805199	0,87814

Расчет количества информации выполняем по формуле (4.11):

$$I(K_i) = H_0 - H_i(K_i).$$

Результаты расчета представлены в табл. 4.10 и смоделированы на рис. 4.1, 4.2.

Таблица 4.10.

Количество информации	t = 2000 ч	t = 4000 ч	t = 6000 ч
$I(K_1)$	0,31788	0,272701	0,048168
$I(K_2)$	-0,04997	-0,11952	0,111017
$I(K_3)$	0,31788	0,308631	0,193761
$I(K_4)$	-0,25555	-0,06893	0,13677
$I(K_5)$	-0,25555	-0,06893	0,13677
$I(K_6)$	0,31788	0,272701	0,048168

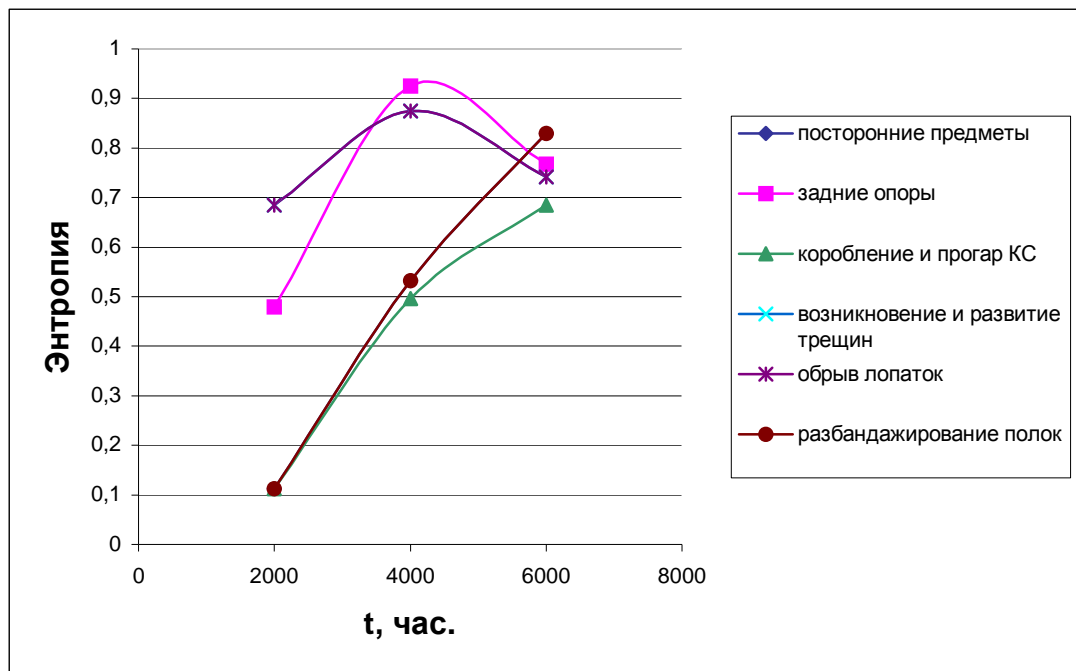


Рис. 4.1. Зависимость информационной энтропии от наработки двигателей ПС-90А

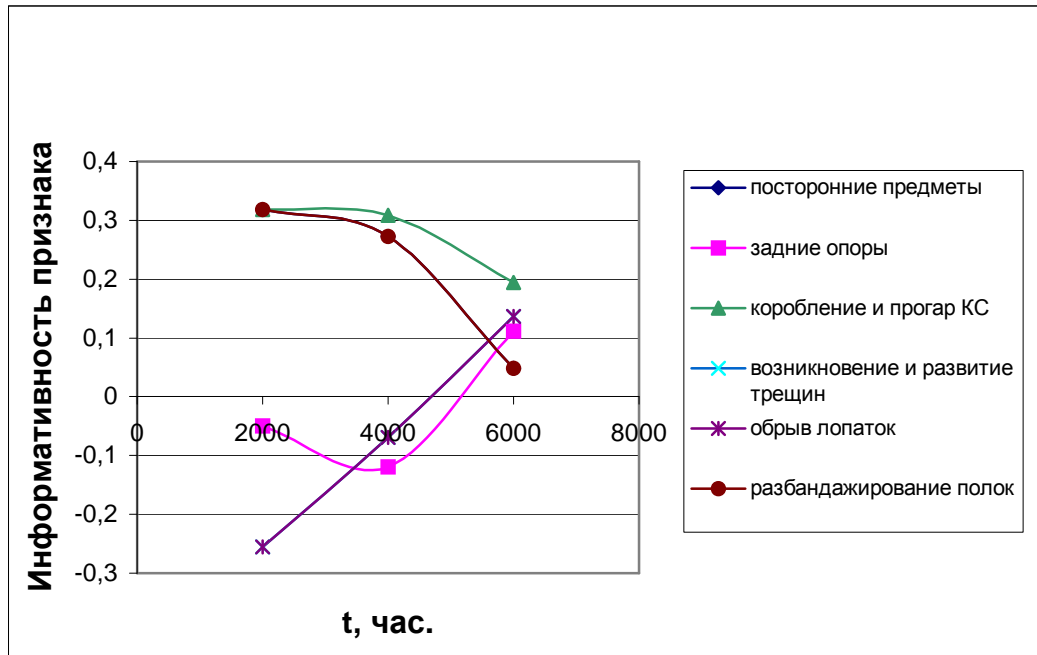


Рис. 4.2. Зависимость информативности признака «повышенная вибрация» от наработки по результатам контроля ПС-90А

Выводы

1. На разных этапах наработки двигателя можно выделить следующие наиболее информативные признаки. На промежутке от 0 до 2000 часов наиболее информативным признаком будет K_6 – разбандажирование полок рабочих лопаток компрессора и K_1 – попадание посторонних предметов во входное устройство и вентилятор. На промежутке от 2000-4000 часов наиболее информативным признаком будет K_3 – коробление и прогары

камеры сгорания. Этот же признак будет наиболее информативным по результатам представленных расчетов и на промежутке наработки от 4000-6000 часов.

2. Некоторые признаки на отдельных участках наработки не несут никакой диагностической информации (например, признак K_2 на промежутке от 0 до 4000 часов или признаки K_4 и K_5 на том же интервале), что объясняется небольшим объемом накопленной информации об отказах и повреждениях в рассматриваемом объеме двигателей для заданных условий.

3. Повышение информационной энтропии (рис.4.1) видимо связано с недостаточностью статистической базы данных по отказам двигателя ПС-90А, что подтверждается накопленным опытом, т.е. *формирование отказов превалирует над их проявлением*. В связи с этим, изображенная на рис. 4.2. информативность признака «повышенная вибрация» по отношению к различным классам состояний также не вполне закономерна.

4. Принимая во внимание основополагающее свойство информационной энтропии - аддитивность, сложим ординаты всех рассмотренных состояний, реагирующих на соответствующий признак. Результирующий график информативности (информационного критерия) вибрации ГТД ПС-90А от наработки представлен на рис. 4.3. Видно, что имеет место упорядоченная закономерность, которая указывает на то, что качество полученной информативности по вибрации возрастает. Отсюда вывод - вибрация сама по себе адаптируется к возможным классам состояний, которые в перспективе можно свести всего лишь к двум - отказы, связанные с нарушением прочности конструкции двигателя, и отказы, связанные с нарушением формы сопрягаемых деталей, т.е. к внезапным и постепенным отказам с соответствующей физикой.

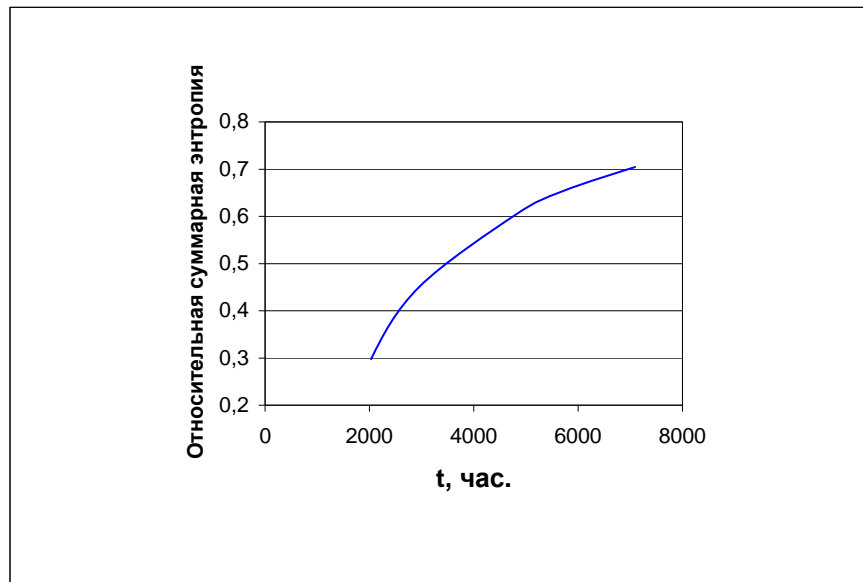


Рис. 4.3. Результирующий график информативности признака «повышенная вибрация» по наработке

5. Таким образом, получается, что повышенная вибрация не может быть точнее двух «адресов». При диагностике новых объектов возможные отказы можно свести к вышеперечисленным группам, что существенно уточняет этап классификации объекта и позволяет произвести правильный выбор методов и средств диагностирования.

Контрольные вопросы к 4-ой главе

1. Назовите основные свойства информационной энтропии.
2. Дайте определение понятиям диагностический признак, диагностический параметр.
3. Что является аргументом функции информационной энтропии?
4. Перечислите наиболее распространенные диагностические признаки, указывающие на предотказное состояние элементов АТ.
5. Что понимается под информативностью диагностических признаков?
6. Какова взаимосвязь информационной энтропии и количества получаемой информации о состоянии объекта диагностики?
7. От чего зависит качество процесса технического диагностирования?
8. В чем заключаются принципы параметрической классификации объектов диагностики АТ?

Глава 5. Информационное обеспечение процессов диагностирования АТ

5.1. Задачи и структура системы сбора и обработки информации

Диагностика АТ является составной частью системы управления техническим состоянием, поэтому эффективность процесса диагностирования зависит от объема и качества информационных потоков. Обширная группа задач диагностики, таких как классификационных, задач прогнозирования состояний авиационных конструкций, поиска отказавших элементов решается на основе громадного массива статистической информации. Однако сбор достоверной информации – трудоемкий и дорогостоящий процесс. Качественно новой ступенью в информационной диагностике является разработка и создание систем информационного обеспечения процессов диагностирования (СИОПД), куда наряду с блоками накопления информации заложены блоки алгоритмов принятия решений (рис.5.1).

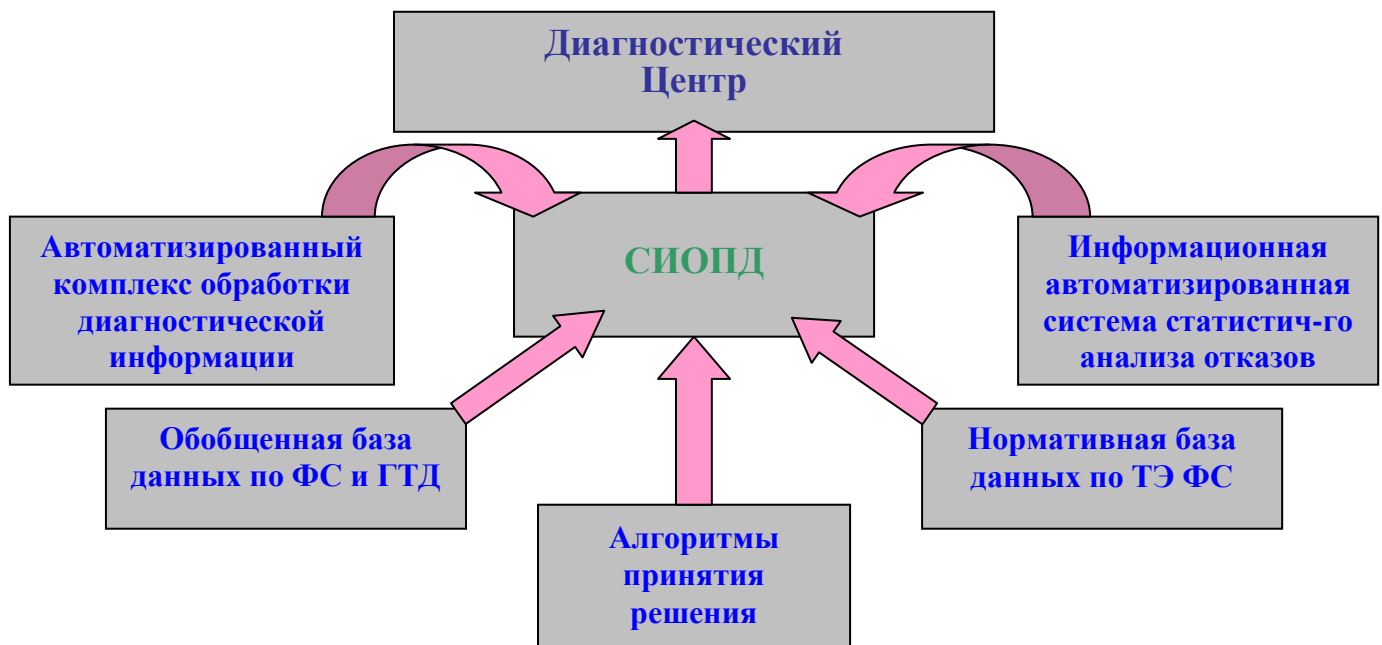


Рис. 5.1. Структура СИОПД

Базовым звеном такого рода систем являются информационно-управляющие ветви по типам эксплуатируемой техники, объединяющие на информационном уровне все необходимые данные, поступающие с предприятий, эксплуатирующих конкретный тип ЛА и АД.

Информационное обеспечение формируется на базе целевой функции «классы – модели – принятие решения». Информационной основой для формирования классов возможных состояний являются, как показано в 4 гл., статистические данные по отказам и неисправностям ЛА и АД. Это могут быть карточки по учету неисправностей (КУН), сводные материалы по надежности АТ и замечания экипажа после завершения полета [39].

Информационно-диагностические системы последовательно решают задачи сбора, обработки, анализ передачи информации об объекте контроля для определения технического состояния. По месту расположения они подразделяются на бортовые (БСКД-90), наземно-бортовые (Анализ-86, МСРП) и наземные системы (СОВА, ФИЛИН). Бортовые системы в свою очередь делятся на внешние и встроенные. Основные задачи бортовых систем – осуществление оперативного контроля за состоянием авиационных конструкций в полете, выдача информации об их состоянии, а в некоторых случаях локализация и ликвидация отказа.

В процессе сбора информации (априорной и апостериорной) для расчетов информационно-диагностических критериев должны решаться следующие задачи: накопление информации об измеренных значениях диагностических параметров с учетом наработки; формирование диагностических признаков и их правильный выбор; накопление информации о временных характеристиках процесса диагностирования; накопление информации об отказах средств диагностики, их поверки и др.

В процессе обработки информации необходимо решить такие задачи, как установление законов распределения значений диагностических параметров; оценка средней продолжительности операций диагностирования; оценка средней стоимости диагностических процедур.

Качественному сбору, полноте и обработке статистических данных должно уделяться особое внимание группой параметров и группой анализа при непосредственном взаимодействии с системой информационной диагностики эксплуатационного предприятия или Диагностического Центра.

Следующим шагом является обработка статистической информации и представление ее в виде таблицы, разбитой на системы или подсистемы в зависимости от глубины исследования. В результате эксплуатант имеет таблицы отказов и неисправностей по каждой конкретной функциональной системе ЛА и АД.

Выбор классов состояний в многомерном пространстве признаков ФС должен осуществляться с учетом реального назначения системы информационной диагностики и располагаемых технических возможностей эксплуатанта по устранению последствий отказов. Как правило, количество диагностируемых классов принимается равным числу управляющих воздействий, подаваемых на объект контроля с целью расшифровки состояния отказа. Так, если при отказах каких-либо блоков ФС предусматривается переключение на дублирующую систему, то нет необходимости различать эти классы между собой. Вполне естественно, что процедура принятия решений реализуется наиболее просто и наглядно при наличии лишь двух классов (состояний) – работоспособности и отказа (исправности, неисправности). При этом имеется в виду, что с помощью последовательного попарного разбиения (принцип дихотомии) указанный подход может быть использован для диагностирования произвольного количества классов.

Следующим этапом предлагается провести работы по анализу и расчету информационных критериев (табл.2.2). После автоматизированного подсчета информационной энтропии производится анализ, и выбираются системы с максимальной энтропией, как наиболее изменчивые и значимые. По результатам расчета количества информации строятся кривые изменения

энтропии по конкретным диагностическим признакам или параметрам, выявляется их информативность.

На заключительном этапе, на основании полученных графиков, выбираются наиболее значимые признаки, что, в свою очередь, дает возможность более качественного отслеживания изменения диагностических параметров по комплексу проявляемых признаков различных ФС ЛА и АД. Это дает возможность персоналу Диагностического Центра тщательным образом сконцентрировать внимание на тех диагностических параметрах, проверки по которым выполняются в первую очередь, позволяет выбрать наиболее информативный метод диагностики, что, несомненно, приближает эксплуатанта к «адресу» дефекта и выявляет его на ранней стадии развития.

5.2. Система информационного обеспечения процессов диагностирования (СИОПД) ГТД

В качестве примера рассмотрим типовую систему информационной диагностики применительно к авиационному ГТД.

При рассмотрении анализа работы систем ГТД интерес предварительно вызывает их структурная организация и способ функционирования. Совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, свойства которых и характер взаимосвязи имеют существенное значение для работоспособности систем, составляют структурную организацию СИОПД ГТД.

При работе авиационного двигателя возникает большое число разнородных по своей физической структуре процессов, параметры которых доступны (табл. 5.1). Характер протекания процессов в ГТД, таких как развитие тяги, расход топлива, выпуск отработанных газов, излучение тепла, шум и вибрация, определяется внешними и внутренними факторами. Первые являются воздействиями на механизм внешней среды или входными воздействиями (перемещение РУД, изменение режимов полета, подача топлива и др.). Вторые связаны с техническим состоянием механизма, т.е. со

свойствами его микроструктуры в рассматриваемый момент времени. При изменении, как тех, так и других факторов характер функционирования систем ГТД изменяется.

Таблица 5.1.

Выборочные параметры ГТД, регистрируемые в полете

Тип ВС	Ту-134	Ту-154	Ил-86	Ил-96	А-310
Тип ГТД	Д-30	НК8-2У, Д 30КУ-154	НК-86	ПС-90А	PW4156А, JT9D-7R4E1, CF6-80А3
Количество параметров	64	64	256	340	556-776
Основные диагностические параметры ГТД	1-ГВТ 2- $n_{нд}$ 3- $n_{вд}$ 4-РУД 5-вибрация	1-ГВТ 2- $n_{нд}$ 3- $n_{вд}$ 4-РУД 5-вибрация	1-ГВТ 2- $n_{нд}$ 3- $n_{вд}$ 4-РУД 5-вибрация 6-мгн. расход 7-давл. топлива 8-давл. масла 9- кол-во масла 10-пожар 11-стружка 12-пож. кран 13-стоп кран 14-опасн. вибр.	1-ГВТ 2- $n_{нд}$ 3- $n_{вд}$ 4-РУД 5-вибрация 6-мгн. расход 7-давл. топлива 8-давл. масла 9-охл. турбины 10-пожар 11-дв. вкл. 12-пож. кран 13-стоп кран 14- опасная вибрация	1-ГВТ, 2- $n_{нд}$, 3- $n_{вд}$, 4-РУД,5-вибрация, 6-мгн. расход топлива, 7-давление топлива, 8-давление масла, 9-охл. турбины,10-пожар, 11-дв. вкл,12-пож. кран, 13-стоп кран , 14-опасная вибрация, 15- ПОС, 16-реверс, 17-реверс на замке, 18-автомат тяги, 19-уменьшение тяги до МГ 20-клапан отбора воздуха, 21-топливный кран, 22-разница давлений, 23-количество масла, 24-Т масла, 25- n верхний предел, 26- n нижний предел, 27-давление масла, 28-клапан перепуска, 29-образование льда и др.

Справедливо и обратное утверждение, если изменились свойства выходных процессов ГТД, то это вызвано или изменением внешних условий его работы, или изменением его технического состояния.

Эффективность диагностирования можно существенно повысить, анализируя тенденции изменения параметра диагностирования по наработке. С этой целью необходимо обеспечить регистрацию параметра и построение

графиков его изменения по времени эксплуатации. Тенденции изменения параметра диагностирования анализируются, как правило, по 10—40 замерам (табл. 5.1.). Так, на ряде зарубежных ГТД выполняется анализ изменения пиковых значений параметра по 25 полетам, а на самолетах «Боинг» решение принимается по 40 замерам в полете на установившемся режиме работы ГТД.

5.2.1. Назначение и цели системы

Система информационной диагностики СИОПД необходима для качественной оценки технического состояния авиадвигателей в Диагностическом Центре с использованием современных методов исследований при максимальных наработках с начала эксплуатации и после последнего ремонта, а также для реализации методов статистического и информационного анализа отказов и неисправностей двигателей в эксплуатации, для планирования расходов в эксплуатации и нормативного контроля над эксплуатацией авиатехники.

Целью создания системы является:

1. Обеспечение безопасности и регулярности полетов за счет раннего обнаружения и локализации неисправностей авиадвигателей.
2. Автоматизация выполнения контроля и диагностики технического состояния на основе анализа полетной информации, результатов опробования авиадвигателей, текущих проверок, в том числе с использованием непосредственно спутниковой связи.
3. Формирование и ведение базы данных по эксплуатирующимся отечественным и зарубежным авиадвигателям, в том числе накопление информации для совершенствования серийного двигателя и его систем.
4. Автоматизация выполнения требований, рекомендаций РЭ и других действующих документов в части контроля состояния и диагностирования двигателей в операционных системах Windows , Millenium, XP и др.

5. Формирование и ведение базы данных по отказам и неисправностям ГТД, систематизация отказов по типам АД, ФС, методам обнаружения и локализации дефектов.

6. Реализация требований Центра безопасности полетов, предъявляемых к системам информационного обеспечения, напрямую влияющих на безопасность полетов.

В состав системы информационной диагностики входит:

а) автоматизированный комплекс по диагностической обработке параметров, предназначенный для обобщенной оценки технического состояния ГТД по результатам наземного опробования, включающий в себя:

- определение приведенных к САУ параметров ГТД;
- сравнение полученных результатов со значениями параметров из формуляра двигателя;
- определение отклонений значений параметров от формулярных значений;
- формирование на основании полученных отклонений рекомендаций по работам, которые необходимо выполнить на двигателе для устранения выявленных неисправностей;
- оценка фактического расхода топлива по парку отечественной АТ и выполнение прогноза по расходу авиатоплива на основании комплексной оценки технического состояния АТ;

б) информационная автоматизированная система статистического анализа отказов и неисправностей, предназначенная для комплексного анализа отказов и неисправностей ГТД, на основании которого выполняется планирование эксплуатации АТ;

в) ведение в диагностическом Центре обобщенной базы данных по эксплуатирующимся в России и за рубежом отечественным авиадвигателям;

г) обеспечение Диагностического Центра нормативной базой данных по технической эксплуатации ГТД;

д) алгоритмы принятия решения по эксплуатации ГТД, выдача соответствующих вариантов эксплуатации, исходя из комплексной оценки состояния авиадвигателей.

5.2.2. Общие требования, предъявляемые к системе

Система информационной диагностики СИОПД должна обеспечивать выполнение всех требований эксплуатационных документов по использованию информации наземного опробования, полетной информации, обеспечению проведения анализа надежности ГТД, нормативного обеспечения технической эксплуатации [32].

Основой методического обеспечения системы являются методические указания и эксплуатационные материалы разработчиков авиадвигателей (методики, математические модели, технологии, алгоритмы принятия решений), а также требования Центра ПЛГ ГВС, директивы и указания ФАВТ.

В качестве исходной информации в системе служат формулярные данные двигателей, результаты опробования двигателей, карты технического состояния двигателей, карточки учета неисправностей, директивы и указания ФАВТ, промышленности и др.

Техническое обеспечение системы включает персональный компьютер типа IBM PC с характеристиками не ниже Pentium-486, HDD 700 Мб, 128 Мб RAM/RAD, DVD.

Система должна реализовывать следующие основные функции:

1. Обработку результатов опробований двигателей и полетной информации.
2. Решение задач контроля, диагностики технического состояния двигателей.

3. Формирование рекомендаций по работам, которые необходимо выполнить на двигателях в первую очередь.

4. Ведение базы данных системы по отказам и неисправностям с выдачей отчетов по надежности согласно требований Центра безопасности полетов, ФАВТ, ГосНИИ ГА.

5. Обеспечение возможности анализа изменения параметров и параметрических комплексов двигателей по наработке, представленного в графическом и табличном видах.

6. Нормативное обеспечение (допуск в эксплуатацию, постановка на особый контроль, снятие с эксплуатации).

7. Поддержание базы данных по двигателям с периодичностью выполнения функций, соответствующих регламенту технического обслуживания.

8. Обеспечение удобного взаимодействия с пользователем (локальная сеть, Интернет).

Выходная информация представляется в виде таблиц и графиков относительно параметров, диагностических и информационных сообщений, а также отклонений значений параметров от нормы в удобной для пользователя форме.

Результаты работы системы содержат диагностические и информационные сообщения, характеризующие техническое состояние систем ГТД. Объем диагностических и информационных сообщений определяется методикой контроля и диагностирования технического состояния двигателя. Основной режим работы системы – автоматизированный анализ информации.

Система оснащается документацией, содержащей исчерпывающую информацию о работе с системой и обеспечивающей обучение персонала Диагностического Центра или эксплуатационных диагностических подразделений.

Должно гарантироваться полное восстановление системы (файлов) после аппаратных сбоев. Допускается защита системы от сбоев с помощью резервного копирования баз данных. Необходимо обеспечение системы защитой информации от несанкционированного доступа.

5.2.3. Требования к программному обеспечению системы

1. Система реализуется в операционной среде Microsoft Windows (Millenium, 2000, XP). Функционирование системы обеспечивается в сетевом и локальном вариантах.

2. Разработка программного обеспечения выполняется на алгоритмических языках высокого уровня, обеспечивающих удобную работу по созданию графического интерфейса.

3. Система должна работать с базами данных существующих версий программного обеспечения, либо иметь средство для конвертации баз данных.

4. Информационное обеспечение системы строится в виде системы баз данных, обеспечивающих хранение и выдачу нормативно-справочной информации, результатов опробований двигателей в виде таблиц и графиков.

5. Система должна быть максимально открытой для пользователя (коэффициенты, контрольные границы - легко меняться в базе данных с использованием программы ведения нормативно-справочной информации).

6. Комплекс технических средств диагностического Центра строится на базе персональных компьютеров в комплектации, обеспечивающей ввод и хранение информации, результатов обработок, отображение и распечатку результатов обработки информации. Комплекс технических средств должен обеспечивать возможность его включения в локальную вычислительную сеть всех авиапредприятий.

7. Система должна быть включена в реестр программных средств Центра безопасности полетов.

8. Все технические документы разрабатываются в соответствии со стандартами единой системы программной документации и комплексом стандартов руководящих документов на автоматизированные системы.

5.2.4. Реализация и совершенствование системы

Система СИОПД реализует: анализ результатов, полученных при опробовании двигателя со средним временем обработки результатов опробования не более 10 минут; сбор, накопление и анализ информации, получаемой системой в течение всего периода эксплуатации двигателя; экспорт и импорт измеряемых и расчетных данных в стандартном формате (DBF, MDB); связь с другими подсистемами АСУ технической эксплуатации посредством локальной единой сети.

Система строится с возможностью дальнейшего ее развития и совершенствования. Главные направления развития включают в себя: совершенствование алгоритмов технического диагностирования; совершенствование процедур информирования пользователей; улучшение эксплуатационных показателей технологичности и других характеристик технической эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В.Г., Майоров А.В., Потюков Н.П. Авиационный технический справочник. - М.: Транспорт, 1975.
2. Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А. Обслуживание систем при ограниченной информации об их надежности.- М.: Сов. Радио, 1976.
3. Барзилович Е.Ю., Воскобоев В.Ф. Эксплуатация авиационных систем по состоянию (элементы теории). - М.: Транспорт, 1981.
4. Биргер И.А. Техническая диагностика.- М.: Машиностроение, 1978.
5. Бонгард М.М. Проблема узнавания.- М.: Наука, 1967.
6. Васильев В.И., Гусев Ю.М., Иванов А.И. и др. Автоматический контроль и диагностика систем управления силовыми установками летательных аппаратов. -М.: Машиностроение, 1989.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. -М.: Наука, 1969.
8. Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. -М.: Наука, 1986.
9. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. – М.: Мир, 1988.
10. ГОСТ 26656-85. Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования.
11. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения.
12. Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов.- М.: Энергия, 1979.
13. Дорошко С.М. Контроль и диагностирование технического состояния газотурбинных двигателей по вибрационным параметрам.- М.: Транспорт, 1984.
14. Ермаков Г.И. Диагностирование технического состояния АД путем анализа работавшего масла.- М.: Изд-во МГА, 1985.
15. Кадомцев Б.Б. Динамика и информация. -М.: Ред. журн. УФН, 1997; 2-е изд. М.: 1999.
16. Казанджан П.К., Тихонов Н.Д., Шулекин В.Т. Теория авиационных двигателей. - М.: Транспорт, 2000.
17. Карасев В.А., Максимов В.П., Сидоренко М.К. Вибрационная диагностика ГТД. -М.: Машиностроение, 1978.
18. Килин С.Я. Квантовая информация. М.: Ред. журн. УФН, 1999.
19. Климонтович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем т 1. - М.: ТОО «Янус», 1995.
20. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ.- М.: Мир, 1984.
21. Кольер Р., Берхарт Д., Лиин Л. Оптическая голография. – М.: Мир, 1973.
22. Коняев Е.А. Техническая диагностика авиационных ГТД. Рига: РКИИГА, 1989.

23. Крылов К.А., Хаймзон М.Е. Долговечность узлов трения самолетов. -М.: Транспорт, 1976.
24. Лозицкий Л.П., Янко А.К., Лапшов В.Ф. Оценка технического состояния авиационных ГТД. -М.: Воздушный транспорт, 1982.
25. Машошин О.Ф. Информационное обеспечение процессов диагностирования авиадвигателей. Егорьевск: В сб. научн. трудов конф. ЕАТК, 2001. с.15-16.
26. Машошин О.Ф. Интерпретация теории К.Шеннона в классификационных задачах информационной диагностики авиадвигателей. - М.: Научный вестник МГТУ ГА № 80, серия: эксплуатация воздушного транспорта и ремонт АТ, безопасность полетов, 2004. с. 60-65.
27. Машошин О.Ф., Бигус А.В. Информационное обеспечение процессов диагностирования авиационной техники. М.: Научный вестник МГТУ ГА № 49, серия: эксплуатация воздушного транспорта и ремонт АТ, безопасность полетов, 2002. с.44-48.
28. Машошин О.Ф., Бигус А.В. Прогнозирование технического состояния ГТД по выбегу ротора. М.: Научный вестник МГТУ ГА №66, серия: эксплуатация воздушного транспорта и ремонт АТ, безопасность полетов, 2003. с. 101-106.
29. ОСТ 1-00156-75. Надежность изделий АТ. Классификаторы признаков неисправностей.
30. Павлов Б.В. Кибернетические методы технического диагноза. -М.: Машгиз, 1964.
31. Пархоменко П.П., Согомоян Б.С. Основы технической диагностики: (Оптимизация процессов диагностирования, аппаратные средства). -М.: Энергоатомиздат, 1981.
32. Пивоваров В.А. Повреждаемость и диагностирование авиационных конструкций. -М.: Транспорт, 1994.
33. Пивоваров В.А. Прогрессивные методы технической диагностики. - М.: МГТУГА, 1999.
34. Пивоваров В.А. Современные методы и средства неразрушающего контроля состояния авиационной техники. -М.: МИИГА, 1988.
35. Пивоваров В.А., Машошин О.Ф. Дефектоскопия гражданской авиационной техники. -М.: Транспорт, 1994.
36. Пивоваров В.А., Машошин О.Ф. Применение аппарата теории статистической классификации к задачам диагностирования авиационной техники. -М.: Научный вестник МГТУ ГА №20, серия: эксплуатация воздушного транспорта и ремонт АТ. Безопасность полетов, 1999. с.25-30.
37. РД 50-690-89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки надежности по экспериментальным данным. - М.: Гос. комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990.
38. Сиротин Н.Н., Коровкин Ю.М. Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей.- М.: Машиностроение, 1979.

39. Смирнов Н.Н., Чинючин Ю.М. Эксплуатационная технологичность летательных аппаратов. -М.: Транспорт, 1994.
40. Смирнов Н.Н., Владимиров Н.И., Черненко Ж.С. Техническая эксплуатация летательных аппаратов. -М.: Транспорт, 1990.
41. Справочник под редакцией В.Г.Александрова. Контроль узлов трения самолетов и вертолетов. - М.: Транспорт, 1976.
42. Стратонович Р.Л. Теория информации. -М.: Сов. радио, 1975.
43. Холево А.С. Введение в квантовую теорию информации.- М.: МЦНМО, 2002.
44. Шеннон К.Э. Работы по теории информации и кибернетике. Под ред. Р.Л.Добрушина, О.Б.Лупанова. -М.: Изд-во иностр. литеp., 1963.
45. Ямпольский Я.М., Белоконь Е.Н. Диагностирование авиационной техники. -М.: Транспорт, 1983.
46. Airbus adopts infrared thermograph for in-service inspection. – Insight. 1994. V. 36. No.10.
47. Ebeling W., Freund J., Schweitzer F. Komplexe Strukturen: Entropic und Information. Stuttgart, Leipzig: B.G.Teubner, 1998.
48. Hirano F., Yamamoto T. Four-Ball Test on Lubricating Oils Containing Solid Particles, “Wear”, 1959.
49. Nielsen M.A., Chuang I.L. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press. Internat inf. 2001.
50. Staton L. Automatic Inspection and Diagnostic Systems for Automative Equipment, «SAE Preprints», 1962.