

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Б.А.Чичков

МОДЕЛИ и
ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА
АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Часть 1

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

для магистрантов по направлению 552000
"Эксплуатация авиационной и космической техники"
и аспирантов спец. 05.22.14

Москва – 2004

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Кафедра двигателей летательных аппаратов

Б.А.Чичков

МОДЕЛИ и
ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА
АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Часть 1

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

для магистрантов по направлению 552000
"Эксплуатация авиационной и космической техники"
и аспирантов спец. 05.22.14

Москва – 2004

Пособие по дисциплине ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ для магистрантов по направлению 552000 "Эксплуатация авиационной и космической техники" издается в соответствии с рабочей программой дисциплины. Может быть использовано аспирантами спец. 05.22.14.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры "Двигатели летательных аппаратов" 9 декабря 2003 г. и методическим советом механического факультета 30 декабря 2003 г.

Научный редактор, рецензент: д.т.н., проф. Коняев Е.А.
(зав. каф. РЛА и АД МГТУ ГА),
д.т.н., проф. Нихамкин М.Ш. (зам. зав. каф.
авиационных двигателей аэрокосмического
факультета ПГТУ),
д.т.н., проф. Пивоваров В.А.
(зав. каф. ДЛА МГТУ ГА)

Принятые сокращения и обозначения

АСД- автоматизированная система диагностирования;
 БСКД - бортовая система контроля двигателя;
 ВД - высокое давление;
 ВС - воздушное судно;
 АД – авиационный двигатель;
 КВД - компрессор высокого давления;
 КНД - компрессор низкого давления;
 КПД-коэффициент полезного действия;
 МНК - метод наименьших квадратов;
 МНМ - метод наименьших модулей;
 НД - низкое давление;
 ПТ – параметр тяги ;
 СДМ – статистическая диагностическая модель;
СтОУ - стандартная ошибка уравнения;
 "пр" -приведенные значения параметров (к стандартным атмосферным условиям и одному режиму);
 ТВД - турбина высокого давления;
 ТНД - турбина низкого давления;
 ТО - техническое обслуживание;
A - свободный член линейной модели первого порядка (размерность результативного признака);
As - асимметрия распределения;
B - угловой коэффициент линейной модели первого порядка (размерность результативного признака, деленная на размерность факторного признака);
Ex - эксцесс распределения;
i - номер элемента отсортированной выборки;
F - отношение дисперсий или обозначение функции (например, $Y = F(X)$);
FF - отношение *F* к табличному значению *F*-распределения;
L (или *N*) - длина (сегмента) ряда наблюдений (объем выборки);
 МАХ - максимум; \max (индекс), \max - максимальное значение;
 МІN - минимум; \min (индекс), \min - минимальное значение;
p - число параметров (регрессионной) модели;
R - коэффициент корреляции;
rang - ранг факторного параметра в иерархии;
tt[A] - отношение эмпирического абсолютного значения *t*-статистики свободного члена *A* к табличному значению *t*-распределения;
tt[B] - отношение эмпирического абсолютного значения *t*-статистики коэффициента *B* к табличному значению *t*-распределения;
*X*_{1..N} - множество входных значений (факторного признака);
*Y*_{1..N} - множество выходных значений (результативного признака);
 \hat{Y}_i - предсказанное значение результативного признака;
 \bar{Y} - среднее выборки значений результативного признака;
 α - уровень значимости.

Наименования и размерности диагностических параметров для ТРДД семейства Д-30(К):

$n_{\text{кнд}}$ - частота вращения ротора компрессора (турбокомпрессора) низкого давления, %;
 $n_{\text{квд}}$ - частота вращения ротора компрессора (турбокомпрессора) высокого давления, %;
 t_6^* - температура газа за турбиной, °С;
 G_T - часовой расход топлива, кг/ч;
 t_m - температура масла на входе в двигатель, °С;
 $V_{\text{по}}$ - уровень вибрации (виброскорость) на разделительном корпусе, мм/с;
 $V_{\text{зо}}$ - уровень вибрации на задней подвеске, мм/с;
 S - скольжение роторов, %.

Наименования режимов функционирования для ТРДД ПС-90А

ркКРЕЙС - режим конец крейсерского полета; рМАХ-режим максимальный (взлетный);
 рМГ-режим малого газа; рНОМ-режим номинальный.

Наименования и размерности параметров для ТРДД ПС-90А

$A_{\text{вна}}$ -угол установки РВНА, °;
 $t_{\text{вх}}$ - температура воздуха на входе в двигатель, °С;
 $P_{\text{вх}}$ - давление воздуха на входе в двигатель, кгс/см²;
 $P_{\text{суф}}$ - давление в системе суфлирования, кгс/см²;
 $t_{\text{пг}}$ или $T_{\text{вГГ}}$ - температура воздуха под панелями газогенератора, °С;
 $t_{\text{мГП}}$ - температура масла на входе в гидропривод (в коробке приводов), °С;
 $t_{\text{мВх}}$ - температура масла на входе в двигатель, °С;
 $P_{\text{мВх}}$ - давление масла на входе в двигатель, кгс/см²;
 $P_{\text{к}}$ - давление воздуха за компрессором, кгс/см²;
 ПТ – параметр тяги;
 G_T - часовой расход топлива, кг/ч;
 $N_{\text{в}}$ - частота вращения ротора вентилятора (НД), об/мин или %;
 $N_{\text{к}}$ - частота вращения ротора компрессора (ВД), об/мин или %;
 $t_{\text{к}}$ - температура воздуха за компрессором ВД, °С;
 $t_{\text{т}}$ или $T_{\text{г}}$ - температура газов за ТНД, °С;
 $t_{\text{л}}$ -температура рабочих лопаток турбины, °С;
 $dT_{\text{м}}^{***}$ - разница температур масла между входом и выходом из подшипника (опоры),
 где ***- узлы КВД, ТВД,ТНД;
 $V_{\text{вРК}}$, $V_{\text{вЗП}}$, $V_{\text{кРК}}$, $V_{\text{кЗП}}$ - виброскорость в зоне разделительного корпуса и задней подвески, мм/с.

ВВЕДЕНИЕ

Многие объекты, составляющие современную среду деятельности и обитания человека, могут рассматриваться как сложные многосвязные объекты (МСО). Например, разного рода предприятия, машины и механизмы, в т.ч. авиационные двигатели (АД). Практически для всех указанных объектов в процессе их функционирования собирается параметрическая и непараметрическая информация, обычно используемая для разнообразной идентификации объектов (например, идентификации состояния, "правильности" функционирования, разного рода балансов и т.д.). При этом особенности связей, да и сами связи, между компонентами объекта, могут быть не всегда устойчивы во времени. В этом случае более адекватными, информативными и полезными, с практической точки зрения, могут являться концептуальные статистические модели, построение которых осуществляется на статистической базе, получаемой с использованием штатной регистрирующей аппаратуры.

Известно, что авиационные АД, в силу своей сложности и значительной нагруженности элементов, требуют повышенного внимания к обеспечению надежности [39,40,52,58] (безопасности полетов ВС). Кроме того, перед эксплуатирующими организациями стоят проблемы уменьшения затрат (временных, стоимостных, по трудоемкости) на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) и процента необоснованного съема авиационных АД.

Эффективным способом решения указанных проблем является использование комплексных систем диагностирования [39,40,50, 51,58 и др.], включающих в себя подсистемы, базирующихся на статистических моделях двигателей, что подтверждается опытом эксплуатации. Система диагностирования в этом случае может рассматриваться как элемент экспертной системы [42], позволяющей определить такие эксплуатационные показатели, как: периодичность проведения работ ТО [18,67], потребные объемы работ, прогнозируемые ресурсы [40,67] и т. п.. Представляется целесообразной разработка не полномасштабных экспертных систем, а систем поддержки решений.

Можно предположить, что в ближайшие несколько лет, по-прежнему, значительный объем перевозок в России будет осуществляться самолетами, оснащенными двигателями с ограниченным перечнем штатно регистрируемых параметров с малой частотой отсчета на крейсерском режиме (условно, по [40] 3 и 4 поколений): Ил-62(НК8-4), Ил-62М(Д-30КУ), Ту-154А,Б(НК8-2У), Ту-154М (Д30КУ-154), Ту-134(Д-30), Ил-76(Д30КП) [1, 40]. Модернизация указанных двигателей в плане расширения перечня регистрируемых параметров, режимов регистрации и значительного повышения частоты отсчетов не предполагается. Таким образом, построение модели и диагностирование в оперативном цикле эксплуатации должно, в основном, осуществляться в условиях ограниченной информации.

В то же время все большая часть транспортной работы выполняется самолетами типа Ил-96 и Ту-204(214), оснащенными ТРДД следующего поколения (по отношению к перечисленным выше двигателям) типа ПС-90А [53]. Перечень параметров и режимов их автоматической регистрации для двигателей типа ПС-90А значительно шире. Кроме того, положительной стороной системы регистрации параметров для рассматриваемых двигателей является малый период между моментами регистрации параметров, что повышает "качество" и достоверность получаемой информации. Однако теория и практика использования получаемой информации с целью построения статистических моделей недостаточно эффективны, в силу "наследования" многих принципиальных черт, характерных для моделей двигателей типа Д-30КУ и аналогичных (тренды параметров по

наработке на выборках априори задаваемых объемов с элементами дисперсионного анализа). Предложенные ранее методические подходы к построению и использованию статистических моделей АД [9,34, 42,43, 44, 55] не позволяют корректно использовать потенциал получаемых статистик и средств вычислительной техники, что в результате сказывается на качестве моделей. Новые методы построения статистических моделей должны раскрыть этот потенциал. Производительность современных ПЭВМ позволяет провести ряд исследований, которые были существенно затруднены 10-15, и даже 5 лет назад. В настоящий момент, становится возможным эффективное построение и практическое использование ряда моделей, предъявляющих серьезные требования к вычислительным возможностям ЭВМ в силу оптимизационного характера решаемых задач.

В двух первых частях пособия рассматриваются модели и параметрическая диагностика для установившихся режимов работы АД. Диагностика переходных процессов-тема отдельного пособия (актуально для ТРДД ПС-90А).

Основными объектами диагностирования, рассматриваемыми в работе, являются массовые в отрасли двухконтурные двухвальные авиационные двигатели семейства Д-30 и ПС-90А.

Описанные методы, качественные выводы могут быть использованы и для аналогичных ТРДД типа Аи-25, НК-8-2, НК-86, Д-36 и др. отечественных, а так же зарубежных двигателей.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ АД. ИСХОДНАЯ ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

1.1. Понятие параметрической диагностики (ПД) АД. Основные термины и определения. Место методов ПД среди прочих методов диагностики АД. Связи между методами, преимущества и недостатки ПД. Распознаваемые состояния. Ошибка 1 и 2 рода.

Напомним основные термины и определения, относящиеся к диагностике в соответствии с рядом ГОСТов [5].

1. Диагностика-отрасль знаний, включающая в себя теорию и методы организации процессов диагноза, а так же принципы построения средств диагноза.

2. Техническая диагностика-наука о распознавании состояния технической системы (объекта - АД).

3. Техническое диагностирование-процесс определения технического состояния объекта диагностирования с определенной точностью.

4. Техническое состояние-совокупность подверженных изменению в процессе эксплуатации свойств объекта, характеризующихся в определенный момент признаками, установленными технической документацией на этот объект.

5. Объект технического диагностирования-изделие или его составные части, техническое состояние которых подлежит определению.

6. Состояние объекта диагностирования-выраженная через определенные параметры степень его работоспособности в данный момент времени.

7. Контроль технического состояния-определение вида технического состояния.

8. Контролепригодность-свойство изделия, характеризующее его приспособленность к проведению контроля заданными средствами по заданным технологиям.
9. Система технического диагностирования-совокупность средств, объекта диагностирования, а также персонала, обеспечивающего процесс диагностирования.
10. Средство технического диагностирования-совокупность устройств и предписаний для проведения диагностирования.
11. Прогнозирование технического состояния-процесс определения технического состояния на предстоящий интервал времени.
12. Алгоритм технического диагностирования-совокупность предписаний о проведении диагностирования.
13. Метод технического диагностирования-определенное физическое или математическое толкование принципа формирования алгоритма диагностирования технической системы (объекта).
14. Способ оценки состояния-сформированное в виде алгоритма правило отнесения состояния объекта диагностики к определенной категории.
15. Диагноз-результат процесса диагностирования системы (объекта) с позиции оценки ее (его) состояния.
16. Параметры состояния-величины, характеризующие способность объекта диагностирования выполнять свои функциональные свойства.
17. Признаки состояния-величины, функционально или вероятно связанные с параметрами состояния.
18. Пространство состояний-множество, образованное совокупностью параметров состояния.
19. Пространство признаков состояния-множество, образованное совокупностью признаков состояния.
20. Информативность признаков состояния-величина, количественно характеризующая значимость признака состояния в оценке самого состояния.
21. Класс состояний-совокупность состояний, объединенная по одному или нескольким признакам.
22. Классификация состояний-разделение множества состояний на классы состояний.
23. Параметр изделия-характеристика изделия, отображающая физическую величину.
24. Контроль параметра изделия-процесс определения соответствия значения параметра требованиям, установленным НТД.
25. Диагностический признак (параметр)-признак (параметр) объекта диагностирования, используемый в установленном порядке для определения технического состояния.
26. Математическая модель-функция, связывающая вектор параметров с варьируемыми параметрами (параметрами состояний), внешними и начальными условиями.
27. Расчетная модель АД-модель, соответствующая расчетным данным АД.
28. Индивидуальная модель АД-модель со значениями параметров индивидуального АД.
29. Среднестатистическая модель-модель со значениями параметров, равными среднестатистическим для данного типа двигателей.
30. Идентификация модели-определение значений параметров, входящих в математическую модель по результатам измерений, содержащих случайные ошибки из условия наилучшего совпадения результатов расчета и измерений.
31. Диагностическая модель АД-математическое описание взаимосвязи между параметрами, характеризующими состояния двигателя или его отдельных элементов с признаками этого состояния.

32. Эффективность диагностики-степень объективности принятия решения о состоянии объекта диагностики при условии минимума потерь.

Одна из основных практических задач технической диагностики - выработка методов распознавания состояния технической системы (постановка диагноза) в условиях достаточно ограниченной информации с использованием некоторых моделей объекта диагностирования и различающих правил (критериев диагностирования) для отнесения его к определенному классу состояний. В большинстве случаев, по отношению к любому МСО невозможно собрать полную информацию, характеризующую его. При измерениях получить точную информацию практически невозможно, а если и возможно, то она чаще всего оказывается малополезной и трудно интерпретируемой. Это как раз тот случай, когда анализируется функционирование сложной или многомерной системы. Информация для большинства отечественных двигателей, за исключением ПС-90А (и в некоторой степени, НК-86) - ограничена, т.к. количество штатно контролируемых параметров большинства отечественных авиационных АД ограничено и частота отсчетов параметров - мала. Для двигателей типа ПС-90А ограниченность в указанном смысле преодолена, однако вся необходимая информация не может быть собрана в силу объективных причин (конструктивных, технологических, методических. Частично ограниченность информации указанного рода устранима за счет использования дополнительных информационных источников: карточек учета неисправностей, актов исследования досрочно снятых АД, карт дефектации ремонтируемых АД, результатов специальных исследований и т.п..

Принципиальная возможность теоретического установления состояния двигателя в выборочном пространстве (перечне всех событий (исходов)- [63]) и управления этим состоянием может быть обоснована т.н. критерием экзогенности [33]. (Этот критерий гласит, что в динамической системе причина всегда опережает ее следствие.)

Если рассматривать процесс классификации состояний АД с позиций описания случайных процессов, то могут быть использованы и положения, известные из теории классификации случайных процессов.

Для случайных процессов с дискретным временем и дискретным множеством возможных состояний для обозначения каждого состояния может быть применен термин "символ", множество возможных состояний названо - алфавитом, а число состояний - объемом алфавита [47]. Тогда задача классификации состояний АД будет подразумевать формирование алфавита и связи текущего состояния АД с одним из символов алфавита.

Установление состояния АД и управление им также связано с понятиями прогноза.

Различают этапы прогнозирования: предварительный (предпрогнозные исследования), ретроспекция, диагноз, проспекция. Задача прогнозирования уточняется одновременно с уточнением структуры объекта и прогнозного

фона, т.е. состава и взаимосвязи их элементов и характеристик, а также с уточнением места объекта в системе классификации объектов прогнозирования. Под инвариантом понимают [33] некоторое обязательно присутствующее свойство прогноза нескольких переменных. Цель анализа объекта диагностирования - разработка диагностической модели объекта (АД), позволяющей посредством экспериментов с ней получать диагностическую информацию об объекте.

Таким образом, одна из задач построения диагностической модели АД может быть сформулирована как нахождение инвариантов, характерных для определенного технического состояния АД.

Главным элементом управления является процесс выработки и принятия решения. Подавляющее большинство задач принятия тех или иных решений в настоящей работе могут быть охарактеризованы как динамические векторные (или скалярные) задачи принятия решений в условиях поведенческой неопределенности поведения АД.

При упреждающем управлении регулирующее воздействие упреждает перспективное противоречие и минимизирует ущерб от не оптимальности развития. При текущем управлении регулирующее воздействие зависит от текущих ситуаций и возникших (текущих) противоречий (у нас-повреждений (неисправностей)).

Следует напомнить, что при решении задач построения моделей и установления состояния АД при параметрическом диагностировании должен соблюдаться принцип системного подхода.

Согласно терминологии фон (или внешняя среда)-есть совокупность объектов и связей между ними, определяющих условия существования и функционирования объекта исследования. По степени воздействия на объект различают активный и пассивный фон. Исходя из формального определения фона, можно, например, рассматривать объект “компрессор” на фоне объекта -“газотурбинный двигатель” в целом и т.д.

Процесс установления состояния и управления им опирается на некоторую информацию. Информация только тогда полезна, когда она может быть использована для различения двух кривых, для идентификации одной из них в присутствии другой.

Теория статистических решений опирается на метод проверки гипотез. Возможны достаточно сложные ситуации, характеризующиеся наличием вложенных гипотез.

Метод проверки гипотез имеет простейшую структуру в том случае, когда существует дихотомия состояний случайной величины.

В задачах статистических решений ошибка первого рода возникает, когда гипотеза верна, но отвергается. Ошибка второго рода возникает, когда гипотеза не верна, но принимается.

Понятие ошибки 1 и 2 рода иллюстрируется рис. 1, 2.

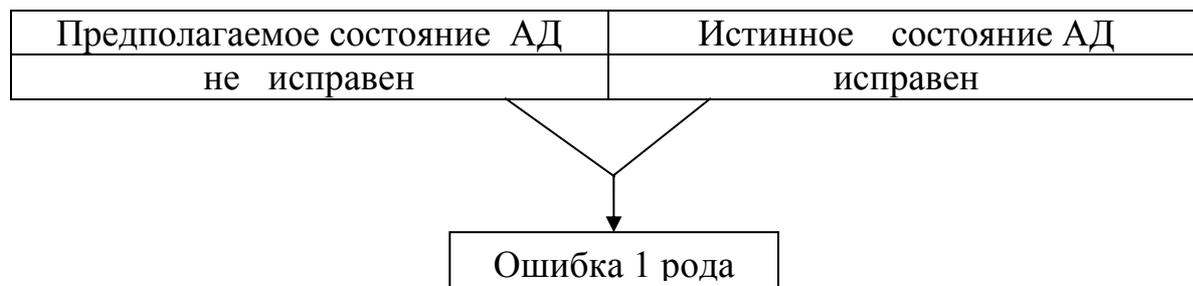


Рис. 1. К понятию ошибки 1 рода

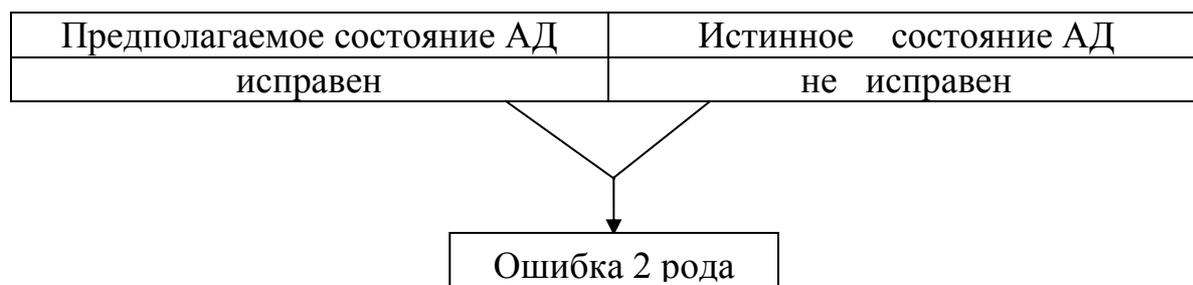


Рис. 2. К понятию ошибки 2 рода

Основная цель теории проверки гипотез в процессе диагностирования АД состоит в том, чтобы построить критерии с наибольшей мощностью (информативностью) при данном уровне значимости. Однако для выбора фиксированного уровня значимости не существует четких правил, поэтому в ряде случаев предпочтительнее использование не априорного уровня значимости, а фактически достигаемого статистикой.

Качество распознавания определяется как отношение числа правильно распознанных реализаций к общему числу реализаций [13].

Чтобы уменьшить вероятность ошибочной классификации в исходно патологических случаях АД необходимо использовать не только базовые модели конкретного АД, но и модели аналогичных АД.

Нормирование параметров диагностических моделей (иначе-моделей установления технического состояния) позволяет выработать критерии, в достаточной степени, инвариантные относительно сдвига и масштаба, осей координат.

Не всегда целесообразно требовать выработки равномерно мощных критериев. Практически (и теоретически) локально наиболее мощные критерии, т.е. критерии наиболее мощные в некоторой окрестности (термин из [15]) позволяют достичь лучших результатов в распознавании состояния АД. Эта особенность перекликается с принципами построения моделей на основании динамического выбора оптимальной длины сегмента ряда наблюдений. Ведь такого рода модели в указанных