

УДК 621.45

**В.М. БОЙКО¹, Н.Д. БАГАУТДИНОВ¹, В.А. СЕДРИСТЫЙ¹, А.А. ГАРЯЧИЙ²,
С.В. ЕПИФАНОВ²**

¹ГП «Ивченко-Прогресс», Украина

²Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

АЛГОРИТМЫ НАЗЕМНОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ТВЗ-117ВМА-СБМ1 НА САМОЛЕТЕ АН-140 ПО ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ПОЛЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННОЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ БОРТОВОЙ НАКОПИТЕЛЬ

Рассмотрены функции ретроспективного диагностирования: тренд-анализ изменения по времени наработки значений параметров газотурбинных двигателей (ГТД); прогнозирование изменения параметров ГТД по времени наработки; статистический анализ значений параметров ГТД.

тренд-анализ, прогнозирование, статистический анализ, г-критерий Хальда-Аббе, S-критерий

Введение и постановка задачи

Автоматизированный контроль технического состояния (ТС) двигателя и его систем осуществляется бортовыми и наземными средствами контроля.

Для повышения эксплуатационных качеств авиационных двигателей и обеспечения их эксплуатации по ТС они оснащаются эффективными бортовыми автоматизированными системами диагностического анализа параметров. Диагностический анализ, выполняемый бортовыми средствами, обеспечивает возможность оперативного и автономного (без связи с наземными службами) контроля технического состояния двигателей.

Комплексная задача обеспечения контроля, оценки и диагностики авиационного двигателя состоит из ряда частных задач, результаты решения которых определяют оценку состояния двигателя, необходимые оперативные действия эксплуатирующего персонала и прогноз на дальнейшую эксплуатацию двигателя.

К частным задачам контроля и диагностирования относятся:

1. Бортовой оперативный (параметрический) контроль текущего ТС двигателя с выдачей экипажу

необходимой для принятия решения и выполнения необходимых действий информации, а также регистрации параметров и событий для их последующей наземной обработки.

2. Наземная диагностическая обработка записей бортовых устройств регистрации (БУР), ведение электронного журнала ТС каждого двигателя с учетом результатов диагностики, принятие решений по диагностическим сообщениям бортового контроля и выдача рекомендаций эксплуатирующим подразделениям.

Наземные средства и методы контроля ТС двигателя и его систем включают:

– автоматизированные (электронные) системы обработки, выдачи и хранения полетной информации, зарегистрированной в БУР, для оценки ТС двигателя и его систем наземным персоналом при выполнении технического обслуживания с применением специализированного программного обеспечения (СПО);

– периодический визуальный осмотр двигателя, агрегатов и коммуникаций систем для оценки их состояния и оптико-визуальный осмотр газозводушного тракта (ГВТ);

– периодический отбор проб масла для определения его характеристик и наличия металлов в масле;

– автоматизированная система обработки для обеспечения принятия решения о дальнейшей эксплуатации двигателя.

На самолете Ан-140 информация о неисправностях, по которым не требуется оперативное вмешательство летного экипажа по их парированию, регистрируются в БУР, и после посадки самолета в кабине экипажа подсвечивается табло «Есть сообщение».

Наземный персонал путем подключения наземных средств может считать зарегистрированную информацию о неисправностях, а также обработать информацию по специальным алгоритмам (программам) для выдачи ее в требуемой форме отображения и анализа.

На самолете Ан-140 установлены следующие электронные средства сбора, обработки и хранения информации:

– РЭД-2000, который принимает 24 параметра и 22 сигнала для использования в системе автоматического управления режимами и контроля двигателя;

– БУК-140, который принимает в кодовом виде информацию из РЭД-2000 для подсвечивания табло САС (система аварийной сигнализации);

– БУР, который регистрирует параметры и сигналы в эксплуатационный бортовой накопитель (ЭБН) для их последующей наземной расшифровки автоматизированными наземными средствами;

– аварийный регистратор (АР), конструктивно входящий в БУР, регистрирует 11 параметров и 20 сигналов, используемых при оценке аварийных ситуаций.

Результаты измерений контролируемых параметров и сигналов двигателя с помощью бортовых и наземных устройств могут преобразовываться в вид,

допускающий ввод их в наземные системы автоматического контроля и обработки параметров.

Решение проблемы

Программные средства наземной автоматизированной обработки предназначены для решения следующих задач:

1. Обработка полетной информации (ПИ) посредством экспресс-анализа, с проверкой правильности результатов контроля двигателя по бортовым алгоритмам, реализованным в РЭД (с занесением ее и результатов обработки в базы данных (БД) по двигателю).

2. Углубленный контроль ТС двигателя и его систем, с использованием индивидуальных моделей их нормального состояния по следующим алгоритмам наземного анализа ПИ:

- контроль запуска;
- контроль маслосистемы;
- контроль топливной системы;
- контроль проточной части;
- контроль вибраций;
- контроль ограничителей РЭД;
- контроль механизации компрессора;
- контроль выдерживания экипажем эксплуатационных ограничений;
- анализ трендов и прогнозирование изменения контролируемых параметров по наработке.
- контроль выработки ресурса по малоцикловой усталости и длительной прочности основных деталей двигателя.

Для трендового контроля, исходя из его задач, должны быть отобраны такие параметры, которые характеризуют техническое состояние двигателя в процессе его эксплуатации с целью анализа длительного изменения этих параметров для оценки и продления ресурса.

Общим для реализованных автоматизированных систем контроля и диагностики (АСКД) с подсисте-

мами трендового анализа является использование следующих групп параметров, характеризующих соответственно:

1. Температурный режим двигателя.
2. Вибросостояние двигателя и трансмиссии.
3. Частота вращения роторов двигателя (и винта).
4. Мощность (тяга, крутящий момент).

Именно такая совокупность параметров обеспечивает достоверность трендового контроля ТС турбовинтового двигателя (ТВД).

Трендовый анализ основан на анализе статистических характеристик результатов регистрации контролируемых параметров с целью определения их стационарности. Классификация методов трендового анализа по принадлежности к одной из задач математической статистики имеет вид:

1. Оценка случайности расхождения между заданным математическим ожиданием и выборочным средним.
2. Оценка принадлежности анализируемых выборок одной генеральной совокупности.
3. Выявление закономерностей в последовательности данных (анализ временных рядов).

Основными функциями ретроспективного диагностирования являются:

1. Тренд-анализ изменения по времени наработки значений параметров ТВД.
2. Прогнозирование изменения значений параметров ТВД по времени наработки.
3. Статистический анализ значений параметров ТВД.

Тренд-анализ выполняется для выбранного интервала зарегистрированных параметров из БД. Базовые настройки работы алгоритма тренд-анализа устанавливаются по результатам отработки на реальной информации. Имеются следующие критерии проведения тренд-анализа:

- г-критерий Хальда-Аббе;
- S-критерий.

Критерий Хальда-Аббе относится к непарамет-

рическим методам тренд-анализа оценки принадлежности двух выборок одной генеральной совокупности, не требующим знания статистических характеристик анализируемого параметра.

Суть метода состоит в том, что на основе последовательных по времени выборочных значений $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$, рассчитывается значение г-критерия:

$$r = \frac{1}{2} * \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{i+1})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}.$$

В практических приложениях первое значение критерия для анализа определяется после накопления пяти первых значений ряда. Рассчитанное значение критерия сравнивается с критическим значением для принятого уровня значимости, заданным в виде таблиц, и если оно меньше допустимого, то принимается гипотеза о наличии тренда.

Интегральные S-критерии принадлежат к параметрическим методам тренд-анализа оценки случайности расхождения между заданными математическим ожиданием и выборочным средним.

S-критерий представляет собой сумму значений параметра, центрированного относительно его текущего математического ожидания, и определяется формулой:

$$S_n = \sum_{i=1}^n (X_i M_i),$$

где $M_i = \frac{1}{i} \sum_{k=1}^i X_k$ – математическое ожидание рассматриваемого ряда.

Прогнозирование зарегистрированных параметров из БД выполняется для выбранного интервала.

Прогнозирование выполняется вперед на определенное число точек, количество которых задается пользователем, временные интервалы при этом вычисляются как среднее значение между начальным и конечным значением наработки рассматриваемого интервала, деленное на число точек прогноза.

Для оптимального выбора метода проведения прогнозирования имеются следующие модели:

- по линейной модели вида $y = a + bx$;
- по квадратичной модели вида $y = a + bx + cx^2$;
- экспоненциальным сглаживанием по линейной модели;
- экспоненциальным сглаживанием по квадратичной модели.

При выборе метода с применением экспоненциального сглаживания вводится постоянная сглаживания. Первые два метода прогнозирования основаны на определении методом наименьших квадратов коэффициентов моделей определенного вида (линейной или квадратичной) с предположением, что данные коэффициенты остаются неизменными по длине обучающей выборки, и далее по данным коэффициентам произвести прогнозирование и расчет границ доверительных интервалов на прогнозные значения.

Сущность метода экспоненциального сглаживания заключается в том, что временной ряд сглаживается с помощью взвешенной скользящей средней, в которой веса подчиняются экспоненциальному закону. Взвешенное скользящее среднее с экспоненциально распределенными весами характеризует значение процесса на конце интервала сглаживания, т.е. является средней характеристикой последних уровней ряда. В данном случае выдвигается гипотеза о том, что коэффициенты линейной или квадратичной модели меняются по времени. Учет изменения коэффициентов осуществляется подбором величины постоянной сглаживания α . Постоянная сглаживания изменяется в пределах $0 < \alpha < 1$. Если α близка к единице, то это приводит к учету при прогнозе в основном влияние лишь последних наблюдений; если близка к нулю, то веса, по которым взвешиваются уровни временного ряда, убывают медленно, т.е. при прогнозе учитываются почти все наблюдения. Рекомендуемое значение этого параметра составляет $0,1 \div 0,2$.

В стандартной конфигурации система настроена на использование линейной модели.

Статистическая обработка зарегистрированных параметров из БД часовых срезов выполняется для выбранного интервала. Данная обработка предусматривает возможность отсева сбойных (не соответствующих статистическим характеристикам анализируемой выборки) значений параметров. Базовые настройки работы алгоритма проведения отсева сбойных значений устанавливаются пользователем. Выводится график изменения выбранного параметра по наработке, гистограмма распределения и основные статистические характеристики:

- математическое ожидание;
- среднеквадратичное отклонение;
- дисперсия;
- минимальное и максимальное значения;
- размер интервала.

Базы данных полетной регистрации имеют значительный разброс параметров, что существенно снижает эффективность статистик тренда и вызывает недопустимые ложные срабатывания. Для снижения влияния указанного фактора в современных АСКД, дополнительно к формулам приведения, используют диагностические модели двигателей, построенные, либо по данным статистической обработки баз данных (регрессионные модели), либо на основе имитационных моделей.

Сопоставление данных имитационного моделирования с базами данных стендовых испытаний двигателя показывает высокую степень соответствия разработанной математической модели реальному поведению двигателя на установившихся и переходных режимах. Такое соответствие дает основание полагать, что ее уточнение с учетом изменения параметров двигателя по наработке будет давать такой же уровень соответствия данным реальной эксплуатации.

В результате тестирования трендовых статистик на выборках параметров регистрации различных

двигателей можно установить следующее:

1. Наилучшие характеристики с точки зрения применения в АСКД имеют статистики Хальда-Аббе, модифицированный S-критерий (учитывающий изменение параметров по наработке) и критерий Фишера.

2. Эффективность критериев тренда существенно зависит от статистических свойств исследуемой выборки, ее стационарности, коррелированности и отличием от нормального распределения отклонений от среднего.

3. Успешное применение трендовых статистик не представляется возможным без статистической (диагностической) модели, соответствующей базам данных конкретного типа двигателя.

4. Для повышения надежности статистических выводов о наличии трендовой компоненты в данных регистрации необходимо иметь данные о статистических (метрологических) характеристиках измерительных каналов АСКД, в частности оценку вида плотности распределения ошибок измерения.

Заключение

Таким образом реализация в эксплуатации программно-аппаратных средств наземной автоматизированной обработки полетных данных, с обязательным использованием трендового анализа позволяет осуществить:

– обнаружение и предупреждение об отказах двигателя для предотвращения катастрофических

ситуаций, нелокализованных разрушений и пожаров по вине двигателя;

– обнаружение большинства неисправностей до того, как они приведут к отказу двигателя в целом;

– обнаружение места неисправности с точностью до съемного узла;

– прогнозирование состояния двигателя по наработке;

– оценку степени выработки ресурса в обобщенных полетных циклах и основных деталей двигателя по малоцикловой усталости.

Что позволяет осуществить переход от планово-предупредительного управления ресурсом двигателя ТВЗ-117ВМА-СБМ1 к эксплуатации по ТС.

Литература

1. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, В.И. Кузнецов, И.И. Богаенко и др. – К.: Техника, 1998. – 312 с.

2. Миргород В.Ф., Ранченко Г.С. Особенности применения трендовых статистик при обработке данных в системах технической диагностики // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – № 4. – С. 25-27.

Поступила в редакцию 7.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.