

УДК 629.7.083.03

ДИАГНОСТИКА АВИАЦИОННОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО НАЛИЧИЮ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ В СИСТЕМЕ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

О.Ф. МАШОШИН, Г.С. ЗОНТОВ

В статье рассматривается контроль состояния авиационного газотурбинного двигателя (ГТД), основанный на анализе примесей вредных веществ в системе кондиционирования воздуха с целью прогнозирования износа уплотнений опор роторов, состояние которых в значительной мере влияет на работоспособность и КПД авиационного ГТД без его демонтажа с воздушного судна.

Ключевые слова: методы технической диагностики, информационная диагностика, авиационный двигатель, прогнозирование состояний, система кондиционирования, газоанализаторы.

Эксплуатация авиационной техники (АТ) происходит при непрерывном изменении технического состояния узлов, агрегатов и деталей вследствие неизбежных процессов старения (изнашивания, усталостных явлений, коррозии и т.д.), что характеризуется постоянным изменением их свойств в целом в сторону ухудшения. Это происходит под действием внутренних и внешних факторов, имеющих либо достаточно строгий детерминированный, либо случайный непредсказуемый характер проявления.

При достижении критического значения величины ухудшения свойств наступает отказ, при котором изделие прекращает частично или полностью выполнять свои основные функции.

Жесткие требования по поддержанию высокого уровня безопасности полетов и наличие значительных факторов опасности обуславливают необходимость более точного и своевременного обнаружения скрытых категорий предотказных состояний авиационной техники, основой которого являются непосредственное наблюдение, регистрация и контроль изменения диагностических признаков технического состояния объекта.

Авиационный двигатель как объект контроля характеризуется возможностью перехода от наблюдаемых признаков к уровню скрытых категорий с использованием различных методов диагностирования при наличии определенных закономерностей изменения его технического состояния.

Однако имеют место отказы и неисправности АТ, отследить тенденцию возникновения и развития которых традиционными методами крайне сложно. Трудность технической диагностики заключается в том, что между признаками и категориями не существует строгих взаимно однозначных связей. Перед началом оценки объекта существует полная неопределенность знания о его состоянии. Одно и то же внешнее проявление неисправности может быть обусловлено большим спектром технических причин и для однозначного вывода одного наблюдаемого признака недостаточно. Необходимо проанализировать комплекс признаков, т.е. серию проявлений дефекта в разных условиях эксплуатации, осуществляя проверки обширного спектра признаков, уменьшая при этом степень неопределенности о состоянии объекта. Зная информационную составляющую, которую несет отдельный признак, можно определить оптимальный комплекс методов и средств оценки реального состояния объекта. Однако для осуществления оптимизации параметров объекта необходима достаточная и достоверная статистика об эксплуатации объектов того же типа.

Классу состояний W_i [$i = 1, 2, \dots, r$] можно найти такую вероятность P_i , что состояние диагностируемого объекта в определенное время t будет принадлежать классу этих состояний. Эти вероятности характеризуют частоту обнаружения состояния класса W_i и проявляются при обширном опыте эксплуатации и диагностики объектов данного типа

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

По вероятности P_i можно оценить незнание о состоянии системы, используя энтропию К. Шеннона

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

При мониторинге состояний ГТД фиксируются определенные внешние признаки и условия, сопутствующие течению процессов. Любой признак может быть рассмотрен в качестве характерного проявления (симптома) определенного состояния. С некоторыми из состояний ГТД он совместим, с другими подобными нет. После обнаружения некоего признака N_j , если этот признак не несет информации о состоянии объекта, вероятности состояний P_i останутся прежними или изменятся, причем в этом случае имеет место энтропия $H\left(\frac{W}{N_j}\right)$, т.е. неопределенность состояния уменьшится.

Признак можно оценить информативностью $J(N_j)$, внесенной им в знание о состоянии системы

$$J(V_j) = H(W) - H\left(\frac{W}{N_j}\right), \quad (2)$$

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

Как видно из формулы (2), чем больше выявленных симптомов (признаков), тем больше наши знания о состоянии системы.

Так, определение технического состояния и прогнозирование износа уплотнений опор роторов ГТД, состояние которых в значительной мере влияет на работоспособность и КПД двигателя, без его демонтажа с воздушного судна и разборки в эксплуатирующих предприятиях возможно только при проведении постоянного мониторинга расхода масла. При этом расход масла не может являться достоверным диагностическим признаком состояния уплотнений роторов, так как на его величину могут непосредственно влиять неисправности маслосистемы, системы суфлирования, отказы коробки приводов, их агрегатов и коммуникаций.

В целях более точного определения технического состояния требуется проведение дополнительного теста для выявления в работе авиационного двигателя различных проявлений, связанных с тестируемым скрытым фактором (в данном случае – износом опор роторов).

Разрушение уплотнений опор двигателя сопровождается попаданием в проточную часть двигателя масла и его дальнейшим сгоранием. Сгоревшее масло через систему кондиционирования двигателя попадает в салон в виде дыма или ядовитых паров с едва уловимым запахом сгоревших нефтепродуктов, что приводит впоследствии к авиационным инцидентам и значительному ухудшению здоровья членов экипажа и пассажиров.

Решение данного фактора в настоящее время реализовано на самолете Боинг-777 установкой в систему кондиционирования воздуха (СКВ) фильтров полной очистки воздуха от примесей.

Однако данный фактор является диагностирующим признаком, свидетельствующим о нарушении целостности уплотнений, а следовательно, нуждается в приборах регистрации наличия частиц масла в воздухе (газоанализаторах). В полете пилот не может своевременно обнаружить едва заметный запах попавших в салон частиц масла, а также выявить, от какого двигателя отбор воздуха является загрязненным. Решением данной проблемы может послужить установка световой индикации загрязнения в СКВ каждого двигателя, находящегося на ВС.

Масло, попавшее в СКВ, может свидетельствовать не только об утечках из маслосистемы ГТД, но и об утечках в турбохолодильной установке (ТХУ). Ввиду данной особенности необходима установка двух газоанализаторов в СКВ каждого двигателя до и после ТХУ (рис. 1).

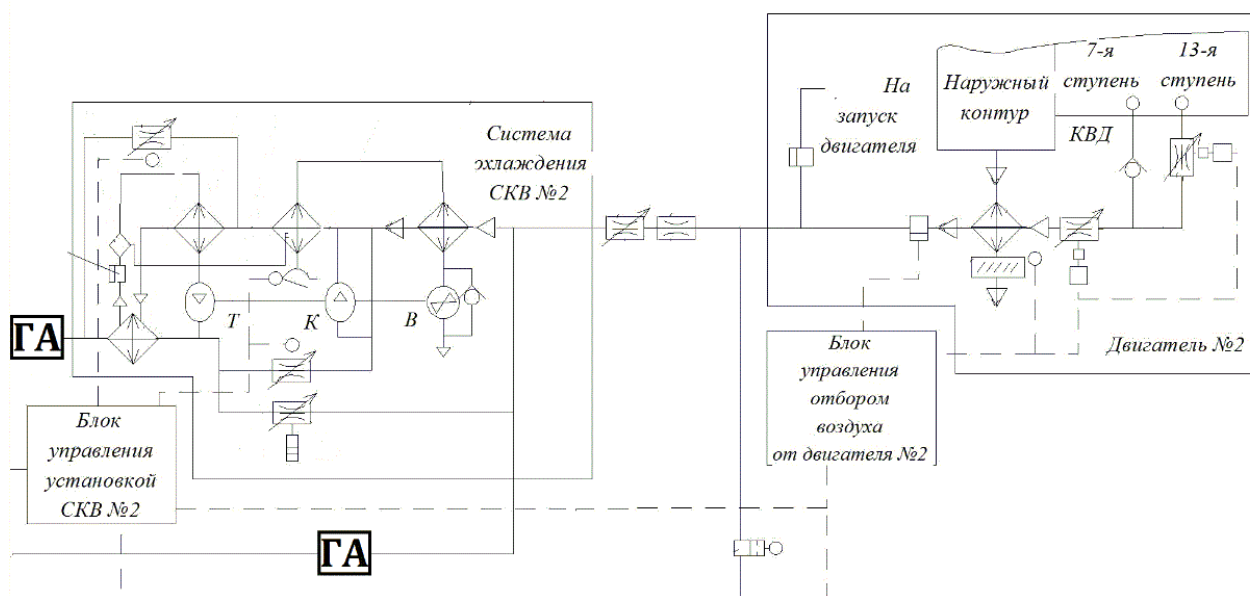


Рис. 1. Система кондиционирования воздуха двигателя Ту-204 и предполагаемые места установки газоанализаторов (ГА)

Требования к газоанализатору:

- выдерживать высокую температуру ($70 - 100^{\circ}\text{C}$) и давление;
- иметь возможность цифровой передачи данных на бортовой компьютер;
- улавливать пары сгорающего масла в пределах допустимой концентрации;
- быть универсальным для большого количества масел;
- иметь малую массу.

Предлагаемый принцип действия газоанализаторов № 1 и № 2, установленных до и после ТХУ, показан на рис. 2.

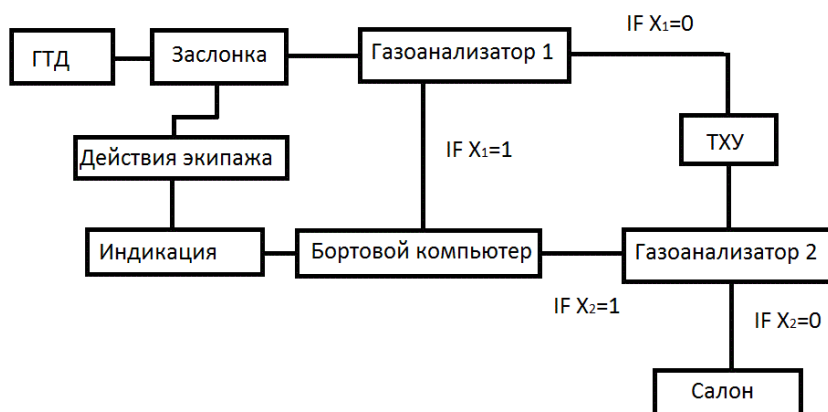


Рис. 2. Принципиальная схема работы газоанализатора

При прохождении воздуха через газоанализатор № 1 формируются данные о наличии вредных примесей ($X_1=1$) или об их отсутствии ($X_1=0$). Эти данные записываются в память бортового компьютера, который передает информацию пилотам в виде световой индикации «Вред-

ные примеси в СКВ», экипаж принимает решение о закрытии отбора загрязненного примесями воздуха. Аналогично и для газоанализатора № 2.

Полученные данные о том, какой из газоанализаторов выявил наличие вредных примесей, могут указывать на то, что утечки масла произошли в авиационном ГТД или ТХУ.

Данные диагностические признаки дополняют собой комплекс признаков, характеризующих состояние уплотнений опор роторов ГТД. Однако нужно выявить оптимальный параметр, дающий максимум информации о системе.

Известно, что если имеется совокупность диагностических признаков $K_1, K_2, \dots, K_{n_0}$, характеризующих различные состояния объекта, то объект в момент времени t может находиться как в исправном состоянии D_0 с вероятностью P_0 , так и в любом из состояний отказов $D_1, D_2, \dots, D_r$ с соответствующими вероятностями. Влияния отказов различных частей объекта осуществляется применением матрицы состояний $W = \|W_{ij}\|_{n_0 \times (r+1)}$ с числом строк и столбцов, равным количеству признаков и количеству всевозможных состояний соответственно. Если параметр dk принимает значения в поле допусков состояния D_j , то $W_{ij} = 1$, в противном случае $W_{ij} = 0$. Часто возникает потребность в выборе ограниченного набора признаков диагностирования, при помощи которых дается допустимая информированность о состояниях объекта. Решение этой задачи возможно с использованием научно обоснованного подхода.

Для начала определяется полная информационная энтропия

$$H_0 = - \sum_{j=0}^r P(D_j) \cdot \ln P(D_j). \quad (3)$$

Реализация каждого признака снижает неопределенность и приносит информацию о состоянии объекта. Средняя условная энтропия после реализации определяется следующим образом

$$H_i(d_{K_i}) = P(d_{K_i}) \cdot H(d_{K_i}) + P(\bar{d}_{K_i}) \cdot H(\bar{d}_{K_i}), \quad (4)$$

где $P(d_{K_i})$ и $P(\bar{d}_{K_i})$ – вероятности получения результатов «в порядке» и «не в порядке» соответственно; $H(d_{K_i})$ и $H(\bar{d}_{K_i})$ – условные энтропии, соответствующие результатам.

Используя матрицу состояний, определяем

$$P(d_{K_i}) = \sum_{j \in \Omega_i} P(D_j), \quad (5)$$

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

$$H(K_i) = - \sum_{j \in \Omega_i} P(D_j / K_i) \ln P(D_j / K_i), \quad (6)$$

где $\sum_{j \in \Omega_i} P(D_j / K_i)$ и $\sum_{j \in \Omega_i} P(D_j / \bar{K}_i)$ – соответствующие результатам диагностирования по признаку K_i условные вероятности, исчисляемые по формуле Байеса

$$P(D_j / K_i) = \frac{P(D_j)}{\sum_{j \in \Omega_i} P(D_j)}. \quad (7)$$

Подставляя (5), (6) в (4), находим количество информации, полученное при диагностировании объекта по некоему признаку K_i

$$I(K_i) = H_0 - H_i(K_i). \quad (8)$$

Выполняя расчет для конкурирующих признаков K_i ($i=1, 2, \dots, n_0$) и ранжируя их по количеству информации об объекте, нетрудно выявить тот признак, у которого количество полезной информации максимально. Контроль данного признака является первоочередным.

Зная информативность диагностических признаков, можно определить эффективность методов диагностики и сформировать комплекс сочетаемых методик для более точной диагностики авиационного газотурбинного двигателя. Метод диагностики авиационного ГТД по наличию вредных примесей в системе кондиционирования воздуха может быть использован в сочетании с более известными методами диагностики, подтверждая и дополняя полученную ими информацию о состоянии системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. - М.: Машиностроение, 1977.
2. Машошин О.Ф. Диагностика авиационной техники: учеб. пособие. - М.: МГТУ ГА, 2007.
3. Степнов М.Н., Гиацинтов Е.В. Усталость легких конструкционных сплавов. - М.: Машиностроение, 1973.

DIAGNOSTICS OF AIRCRAFT GASTURBINE ENGINES BY THE PRESENCE OF HARMFUL IMPURITIES IN THE AIR CONDITIONING SYSTEM

Mashoshin O.F., Zontov G.S.

The article considers the control of the state of aviation gas turbine engine (GTE), based on the analysis of harmful substances impurities in the air conditioning system in order to predict seal wear of rotor supports, the state of which largely affects the performance and efficiency of gas turbine engines, without removing it from the aircraft.

Key words: methods of technical diagnostics, diagnostics information, aircraft engine, prediction states, air conditioning, gas analyzers.

Сведения об авторах

Машошин Олег Федорович, 1966 г.р., окончил МИИГА (1989), доктор технических наук, профессор МГТУ ГА, начальник УТЦ МГТУ ГА, автор более 70 научных работ, область научных интересов – техническая эксплуатация и диагностика авиационной и космической техники, прочность и живучесть авиационных конструкций.

Зонтов Георгий Сергеевич, 1990 г.р., окончил МГТУ ГА (2012), аспирант МГТУ ГА, область научных интересов – техническая диагностика авиационной техники.