DOI: 10.15593/2224-9982/2020.61.02

УДК 629.7.016.84

Х.С. Ахмед, Б.М. Осипов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

ДИАГНОСТИКА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ ДЕФЕКТОВ В ЕГО УЗЛАХ

Составление адекватных математических моделей исследуемых объектов для систем автоматизированного проектирования достаточно сложно. Повысить достоверность решения, принимаемого с помощью математических моделей, можно, в частности, путем уточнения параметров моделей по результатам эксперимента (идентификацией).

Существует ряд методов идентификации, отличающихся по используемому критерию адекватности и опирающихся на различную априорную информацию. При выборе метода идентификации необходимо учитывать сложность получения достаточно полной экспериментальной информации при испытаниях. Из-за недостатка информации при идентификации объективно имеется целая область возможных решений (множество сочетаний значений варьируемых параметров) с приемлемым значением критерия адекватности. Поиск минимума при этом представляет собой сложную в вычислительном отношении задачу (очень вытянутые «овраги»), но более серьезной проблемой является то, что решение потенциально неустойчиво относительно особенностей экспериментальных данных (положение минимума может заметно сместиться при небольшом изменении исходных данных). В этом случае необходимо использовать специальные математические методы решения подобных некорректных задач, позволяющие получать устойчивые оценки варьируемых параметров.

Анализ методов показал целесообразность применения метода гребневых оценок с определенными усовершенствованиями. Опыт работы с программой подтвердил работоспособность метода.

Предварительная обработка полученной информации осуществляется исключением грубых ошибок измерения и приведением измеряемых параметров к одним условиям полета и к одному режиму. В большинстве методик приведение измеряемых параметров к стандартным атмосферным условиям осуществляется с помощью среднестатистических дроссельных характеристик, полученных при стендовых испытаниях нескольких двигателей данной серии.

Ключевые слова: авиационный газотурбинный двигатель, техническая диагностика, термодинамический параметр, математическая модель, локализация дефекта, линейная модель.

H.S. Ahmed, B.M. Osipov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Kazan, Russian Federation

DIAGNOSTICS OF A GAS TURBINE ENGINE WITH LOCALIZATION OF DEFECTS IN ITS NODES

Drawing up adequate mathematical models of the studied objects for computer-aided design systems is quite difficult. To increase the reliability of a decision made using mathematical models, you can, in particular, by specifying the parameters of the models based on the results of the experiment (identification).

There are a number of identification, methods that differ by the adequacy criterion is using and is basing on different a priori information. When choosing the identification method, it is necessary to take into account the complexity of obtaining sufficiently complete experimental information during tests. Due to the lack of information in the identification process, there is objectively a whole range of possible solutions (a set of combinations of values of variable parameters) with an acceptable value of the adequacy criterion. Finding the minimum is a computationally difficult task (very elongated "gullies"), but a more serious problem is that the solution is potentially unstable relative to the features of the experimental data (the position of the minimum can shift markedly with a small change in the original data). In this case, it is necessary to use special mathematical methods for solving such incorrect problems, which allow us to obtain stable estimates of variable parameters.

Analysis of the methods has shown the feasibility of using the method of ridge estimates with certain improvements. Experience with the program has confirmed that the method works.

Preliminary processing of the received information carried out by excluding gross measurement errors and bringing the measured parameters to the same flight conditions and to the same mode. In most methods, the measured parameters adjusted to standard atmospheric conditions using the average throttle characteristics obtained during bench tests of several engines of this series.

Keywords: aircraft gas turbine engine, technical diagnostics, thermodynamic parameter, mathematical model, defect location, linear model.

Методика расчетов для определения состояния диагностируемого двигателя

Блок контроля осуществляет оперативную проверку одного из двух основных состояний двигателя, которые определяются путем равенства дисперсий относительных невязок измеряемых параметров диагностируемого и эталонного (бездефектного) двигателей. Для решения этой задачи выполняются следующие операции:

1. Приведение измеряемых параметров к эталонному режиму.

Формулу можно записать как

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \sum_{M=1}^N \delta z_{iM} d_{ijM},$$

где $\Delta \varepsilon_{ij}$ – поправка приведения j -го измеряемого параметра.

2. Вычисление взвешенных относительных невязок измеряемых параметров от их эталонных значений – определяется по формуле

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \left(\frac{y_{ij} - y_{ijo}}{y_{ijo}} - \Delta \varepsilon_{ij} \right) \sqrt{P_i P_j}.$$

3. Вычисление дисперсии взвешенных относительных невязок измеряемых параметров.

Поскольку все взвешенные относительные невязки являются безразмерными и равноточными, каждую из них можно рассматривать как непрерывную случайную величину, а все вместе как выборку из существующей генеральной совокупности, часть которой удалось обнаружить измерениями. Для исследования выборки определяется дисперсия взвешенных относительных невязок (использование других статистических данных – математического ожидания, асимметрии и эксцесса – не дало положительных результатов):

$$D[\bar{\varepsilon}_{ij}] = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\bar{M}_{ij})^2}{\sum_{i=1}^n j i - 1}, \quad (1)$$

где M_{ij} – математическое ожидание взвешенных относительных невязок измеряемых параметров.

Поскольку в качестве параметров эталонного двигателя используются математические

ожидания результатов его испытаний, а дисперсия в формуле (1) вычисляется по значениям отклонений параметров эталонного двигателя, математическое ожидание отклонений этих параметров всегда равно нулю и формула (1) упрощается:

$$D[\bar{\varepsilon}_{ij}] = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\bar{\varepsilon}_{ij})^2}{\sum_{i=1}^n j i - 1}. \quad (2)$$

Формула (1) используется как для расчета дисперсии взвешенных относительных невязок измеряемых параметров контролируемого двигателя (D_k), так и для расчета эталонного значения дисперсии (D_0), которое определяется в начале испытаний данного двигателя (заведомо бездефектного), а затем хранится.

4. Определение состояния двигателя.

Для определения состояния двигателя применяется критерий Фишера, по нему осуществляется проверка гипотезы несущественности различия между выборочными дисперсиями – D_0 и D_k [1–4]. Выбор критерия Фишера определяется возможностью его применения при разных числах степеней свободы проверяемых дисперсий, простотой расчетной формулы и доступностью табличных значений критерия. Расчетное значение критерия Фишера определяется по соотношению

$$F = \frac{D_k}{D_0},$$

где F – расчетное значение критерия Фишера; F_0 – табличное значение критерия Фишера для заданной доверительной вероятности (обычно – 0,95) при числе степеней свободы максимальной дисперсии D_k и числе степеней свободы минимальной дисперсии D_0 (см. знаменатель формулы (2)).

Если $F_0 > F$, то D_k и D_0 принадлежат одной выборке, т.е. отклонения измеряемых параметров контролируемого двигателя вызваны случайными погрешностями измерений. Следовательно, двигатель не имеет неисправностей, состояние его исправное.

Если $F_0 < F$, т.е. D_k и D_0 имеют существенные различия, то отклонения измеряемых параметров вызваны не только случайными погрешностями измерений, а другими факто-

рами [5], как правило дефектами. Значит, состояние контролируемого двигателя предположительно неисправное, он, по-видимому, дефектный, необходимо определить следующий класс состояний – дефектный узел. Данный вывод является предварительным и уточняется при поиске дефектного узла.

Определение одиночных дефектов

В основу алгоритма диагностики положено предположение о том, что диагностируемый двигатель может иметь одновременно не большое число дефектов – один, два или три дефектных узла. Исходя из этого алгоритм диагностики построен таким образом, что вначале определяется наличие одиночного дефекта, затем осуществляется проверка на наличие более одного дефекта. Если наличие не подтверждается, то работа алгоритма заканчивается. Если наличие более одного дефекта подтверждается, то производится поиск двух дефектных узлов и т.д. Поскольку присутствие более трех дефектных узлов одновременно маловероятно, поиск ограничен определением лишь трех дефектных узлов. В случае большего числа дефектных узлов на печать выдается только сообщение об этом.

В настоящее время запланировано определение 25 возможных дефектов для двигателей различных конструктивных схем¹ [6–8]. Дальнейшее наращивание количества возможных дефектов не связано с изменениями алгоритма и обеспечивается лишь за счет программирования соответствующего сообщения о месте дефекта. Для конкретного диагностируемого двигателя количество контролируемых узлов выбирается из всей номенклатуры дефектов в соответствии с конструктивной схемой двигателя и, как правило, оно постоянно (таблица). Ниже приводится последовательность алгоритма определения одиночного дефекта:

1. Для первого предполагаемого дефекта (из N рассматриваемых) автоматически формируется система нормальных уравнений, которая в матричной записи имеет вид

$$\mathbf{B}\bar{\mathbf{X}} = \mathbf{A}, \quad (3)$$

где $\mathbf{B}$ – матрица нормальных уравнений; $\mathbf{A}$ – вектор свободных членов; $\bar{\mathbf{X}}$ – вектор относительных отклонений параметров состояния диагностируемого узла.

2. Решается система (3). Для решения данной системы необходимо произвести обращение матрицы $\mathbf{B}$ и умножение ее на вектор $\mathbf{A}$:

$$\bar{\mathbf{X}} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A}. \quad (4)$$

Для обращения матрицы $\mathbf{B}$ используется метод окаймления, как наименее чувствительный к плохой обусловленности матрицы [9].

3. Определяются остаточные невязки для всех значений j -го измеряемого параметра на i -м режиме:

$$\xi_{ij} = \sum_{k=1}^l \left[\bar{X}_{ik} \left(\frac{\partial y_{ij}}{\partial x_{ik}} \right) - \bar{y}_{ij} \right],$$

где l – количество параметров состояния, определяемых по системе (4).

4. Рассчитывается дисперсия остаточных невязок:

$$D[\xi_{ij}] = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\xi_{ij})^2}{\sum_{i=1}^n ji - 1}.$$

Аналогичные расчеты проводятся для всех N предполагаемых дефектов. В результате расчетов формируется вектор дисперсий остаточных невязок.

5. Определяется минимальная дисперсия остаточных невязок – D_{M1} .

Анализируется вектор дисперсий остаточных невязок и выбирается минимальная из них – D_M . Минимальная дисперсия остаточных невязок является критерием, характеризующим предполагаемый дефективный узел [10]. Это обусловлено тем, что связь между параметрами и признаками состояния однозначная, т.е. только за счет изменения параметров состояния дефектного узла можно получить адекватную исследуемому классу состояний математическую модель (кроме случаев, описанных в пункте «Особенности определения труднораспознаваемых дефектов»). В свою очередь, адекватная математическая модель характеризуется минимальными остаточными

¹ ГОСТ 26656–85. Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 1985. 10 с.

Экспериментальные данные двигателя TJ-100A-Z

Номер эксперимента	T_n	P_n	n	$T_{2к}^*$	$P_{2к}$	G_T	$T_{вых}$	R
1. (03.10.2014)	287,65	0,100625	30071	318	0,1009	25,34	710,15	0,01156
2. (23.09.2015)	294,85	0,101838	37494	367,6	0,102438	36,37	722,15	0,1128
3. (15.10.2016)	289,25	0,102375	40048	391,11	0,103275	43,52	706,15	0,2004
4. (02.12.2017)	279,55	0,103272	42096	403,15	0,104292	48,15	655,15	0,2676
5. (04.04.2018)	281,35	0,096885	56253	484	0,426665	99,25	967,15	0,8561

невязками между экспериментальными, рассчитанными по этой модели признаками состояния [11]. Таким образом, используя анализ дисперсий остаточных невязок, можно выявить предполагаемую адекватную модель (дефектный узел) по минимальной дисперсии остаточных невязок – D_{M1} .

6. Проверка предполагаемого дефекта.

Наличие минимальной дисперсии остаточных невязок является лишь необходимым условием, но недостаточным. Ввиду этого для подтверждения с заданной доверительной вероятностью достоверности определения дефекта необходима проверка. По аналогии с анализом в блоке контроля для этой цели применяется критерий Фишера о проверке гипотезы несущественности различия между двумя выборочными дисперсиями. Расчетное значение критерия Фишера определяется из соотношения

$$F_1 = \frac{D_k}{D_{M1}}, \quad (5)$$

где F_1 – расчетное значение критерия Фишера при подтверждении одиночного дефекта.

Если $F_0 > F_1$, то D_k и D_{M1} принадлежат одной выборке. Из этого следует, что параметры состояния предполагаемого дефектного узла не уменьшают остаточные невязки настолько, чтобы считать его математическую модель адекватной [12]. А так как дисперсия остаточных невязок остальных контролируемых узлов больше, чем D_{M1} , то их параметры состояния тем более не позволяют получить адекватную математическую модель. В то же время блок контроля определил состояние двигателя как неисправное. В этом случае алгоритм диагностики выдает сообщение, что среди проверенных узлов дефектный не обнаружен, а данная ситуация требует дополнительного анализа. Необходимо отметить, что на практике такая ситуация наблюдалась лишь

однажды. Причиной этому послужила неточность в составлении массива дефектов, когда в проверяемый набор дефектов не был включен искомый дефект (рис. 1).

Рис. 1. Геометрическая интерпретация отсутствия дефектного узла среди проверяемых:
 --- – уровень дисперсии остаточных невязок дефектного двигателя; — – уровень дисперсии остаточных невязок бездефектного двигателя;
 • – дисперсия остаточных невязок контролируемых узлов

В случае если $F_1 > F_0$, то D_{M1} и D_k имеют существенные различия. Следовательно, с заданной доверительной вероятностью (по которой табличное значение критерия Фишера – F_0) узел с минимальной дисперсией, и сообщение об этом выдается на печать.

7. Проверка наличия кратных дефектов.

Определение одного дефектного узла еще не означает, что нет других дефектных узлов, поэтому проводится дальнейший анализ. Сущность его сводится к подтверждению предположения о том, что в случае отсутствия кратных дефектов изменение параметров состояния найденного дефекта дает настолько малые значения остаточных невязок, что они становятся соизмеримыми с погрешностями измерения, т.е. появляется возможность сравнить D_{M1} с дисперсией эталонного двигателя – D_0 . В противном случае, изменение параметров состояния найденного дефекта не обеспечивает столь малых остаточных невязок, т.е. имеется возможность дальнейшей их минимизации, которую мож-

но осуществить путем изменения совокупности параметров состояния двух (трех) узлов одновременно [13].

Проверка осуществляется также по критерию Фишера. Его расчетное значение определяется по формуле

$$F = \frac{D_{M1}}{D_0}.$$

Если $F_0 > F$, то D_{M1} и D_0 принадлежат одной выборке, т.е. остаточные невязки найденного дефектного узла одного порядка со случайными погрешностями измерений, тем самым подтверждается отсутствие кратных дефектов, и блок диагностики заканчивает свою работу.

Если $F_0 < F$, т.е. D_{M1} и D_k имеют существенные различия, что определяет ситуацию наличия кратных дефектов [14], которые необходимо выявить (см. пункт «Определение кратных дефектов»).

Для иллюстрации вышепредставленного анализа приводится геометрическая интерпретация следующих ситуаций:

- отсутствие дефектного узла среди проверяемых (см. рис. 1);
- наличие одиночного дефекта (рис. 2).

Рис. 2. Геометрическая интерпретация одиночного дефекта: - - - – уровень дисперсии остаточных невязок дефектного двигателя; ——— – уровень дисперсии остаточных невязок бездефектного двигателя; ● – дисперсии остаточных невязок одиночных дефектов; ▲ – дисперсия остаточных невязок найденного дефекта

Рисунки выполнены по результатам тестирования двигателя ТЖ-100 и наглядно отражают основные положения анализа.

Определение кратных дефектов

Выявление кратных дефектов осуществляется аналогично определению одиночных дефектов по тем же расчетным формулам

(см. предыдущий пункт). Однако оно имеет ряд особенностей.

1. Особенности определения двойных дефектов.

А. При определении наличия более одного дефекта автоматически формируется новый массив дефектов [15], который в данном случае представляет набор пар дефектов. Для этого подтвержденный одиночный дефект записывается в сочетании с остальными проверяемыми дефектами.

Б. В соответствии с новым массивом дефектов система нормальных уравнений формируется для двух узлов, одним из которых является ранее подтвержденный дефектный узел. В результате решения $(N-1)$ системы нормальных уравнений составляется вектор дисперсий остаточных невязок для двойных предполагаемых дефектов.

В. Для подтверждения выявленного предполагаемого двойного дефекта также используется критерий Фишера, только его расчетное значение определяется из следующего соотношения:

$$F_2 = \frac{D_{M1}}{D_{M2}},$$

где F_2 – расчетное значение критерия Фишера при подтверждении двойного дефекта; D_{M2} – значение минимальной дисперсии остаточных невязок предполагаемого двойного дефекта.

Анализ осуществляется следующим образом:

Если $F_0 > F_2$, то D_{M1} и D_{M2} принадлежат одной выборке, т.е. предположение о наличии двух дефектных узлов не подтверждается, имеется только один дефектный узел – подтвержденный ранее одиночный дефект (рис. 3).

Если $F_2 > F_0$, то D_{M1} и D_{M2} имеют существенные различия, значит, параметры состояния двух узлов (соответствующих D_{M2}) имеют меньшие остаточные невязки [16], чем ранее подтвержденный один узел, следовательно, контролируемый двигатель имеет два дефектных узла (рис. 4).

Г. После подтверждения наличия двойного дефекта необходима проверка наличия тройного дефекта. Для этого определяется расчетное значение критерия Фишера по формуле

$$F = \frac{D_{M2}}{D_0}.$$

Рис. 3. Геометрическая интерпретация отсутствия двойного дефекта: - - - – уровень дисперсии остаточных невязок дефектного двигателя; ——— – уровень дисперсии остаточных невязок бездефектного двигателя; — • — – уровень дисперсии остаточных невязок одиночного двигателя; ● – дисперсии остаточных невязок одиночных дефектов; ■ – дисперсии остаточных невязок двойных дефектов; ▲ – найденный одиночный дефект

Рис. 4. Геометрическая интерпретация двойного дефекта: - - - – уровень дисперсии остаточных невязок дефектного двигателя; ——— – уровень дисперсии остаточных невязок бездефектного двигателя; ● – дисперсии остаточных невязок одиночных дефектов; ▲ – найденный двойной дефект

Если $F_0 > F$, то D_{M2} и D_0 принадлежат одной выборке, т.е. полученные значения остаточных невязок соизмеримы со случайными погрешностями измерений, значит, дефекты, кратные трем, отсутствуют, и блок диагностики заканчивает работу.

Если $F_0 < F$, то D_{M2} и D_0 имеют существенные различия, т.е. остаточные невязки превосходят значения случайных погрешностей измерений, что определяет ситуацию наличия более двух дефектных узлов.

Особенности определения тройных дефектов.

А. При определении наличия более двух дефектных узлов автоматически формируется новый массив дефектов, который в этом слу-

чае состоит из триад проверяемых дефектов. Триады получаются путем образования сочетаний двух подтвержденных дефектов с оставшимися из числа рассматриваемых.

Б. Система нормальных уравнений формируется уже для трех узлов, в соответствии с новым массивом дефектов. В результате решения $(N - 2)$ систем нормальных уравнений образуется вектор дисперсий остаточных невязок для тройных предполагаемых дефектов.

В. Для подтверждения выявленного предполагаемого тройного дефекта используется следующее расчетное значение критерия Фишера:

$$F_3 = \frac{D_{M2}}{D_{M3}},$$

где F_3 – расчетное значение критерия Фишера при подтверждении тройного дефекта; D_{M3} – значение минимальной дисперсии остаточных невязок предполагаемого тройного дефекта.

При этом анализ осуществляется следующим образом:

Если $F_0 > F_3$, то D_{M2} и D_{M3} принадлежат одной выборке, следовательно, предположение о наличии трех дефектных узлов одновременно не подтверждается [17], значит, имеется только два дефектных узла, подтвержденных ранее.

Если $F_3 > F_0$, т.е. D_{M2} и D_{M3} имеют существенные различия, значит, найденные три узла являются дефектными (рис. 5).

Рис. 5. Геометрическая интерпретация наличия трех дефектов: - - - – уровень дисперсии остаточных невязок дефектного двигателя; ——— – уровень дисперсии остаточных невязок бездефектного двигателя; ● – дисперсии остаточных невязок одиночных дефектов; ▲ – дисперсия остаточных невязок найденного тройного дефекта

Г. В случае подтверждения наличия тройного дефекта осуществляется лишь проверка на отсутствие-наличие четырех дефектных узлов.

Для этого находится расчетное значение критерия Фишера по формуле

$$F = \frac{D_{M2}}{D_0}.$$

И проводится следующий анализ.

Если $F_0 > F$, то D_{M2} и D_0 принадлежат одной выборке и делается вывод о том, что дефекты, кратные четырем, отсутствуют.

Если $F_0 < F$, т.е. D_{M2} и D_0 имеют существенные расхождения, что свидетельствует о наличии более трех дефектных узлов, так как изменение параметров состояния этих дефектов не позволяет уменьшить остаточные невязки до уровня случайных погрешностей измерений.

В обоих рассмотренных случаях на печать выдается соответствующее сообщение и работа алгоритма диагностики заканчивается.

Особенности определения труднораспознаваемых дефектов

Плохая разделяемость дефектов обусловлена в основном недостаточностью диагностической информации и может зачастую привести к неправильному их определению. Это связано с тем, что в условиях ограниченной диагностической информации не всегда будет соблюдаться положение об однозначности связи между параметрами и признаками состояния. Так, например, изменение параметров состояния двух разных дефектов может привести к близким изменениям признаков состояния или изменение параметров разных кратных дефектов может оказать практически одинаковое влияние на признаки состояния [18]. Эффективность работы алгоритма при этом понижается, так как возникают сложные ситуации:

1) определяется ложный дефект, истинный близок к нему;

2) определяется истинный дефект, ложный близок к нему.

Для выявления таких ситуаций, требующих проведения дополнительного анализа, в алгоритме применяется критерий разделения дефектов:

$$K_p = \frac{D - D_M}{D_M},$$

где D – дисперсия остаточных невязок, ближайшая по уровню к минимальной дисперсии остаточных невязок D_M .

Опыт работы показал, что в случае, когда значение критерия разделения дефектов K_p больше 1, дефекты хорошо разделимы и истинному дефекту всегда соответствует минимальная дисперсия остаточных невязок D_M . Если критерий разделения дефектов находится в интервале $0 \leq K_p < 1$, то возможно существование приведенных ранее ситуаций. В этом случае дефект, которому соответствует значение D , расценивается как менее вероятный по сравнению с дефектом, которому соответствует D_M , и проходит проверку подтверждения с заданной доверительной вероятностью достоверности своего определения (см. формулу (5)). При этом анализ осуществляется следующим образом.

Если $F_0 < F$, то D и D_k принадлежат одной выборке, следовательно, предположение о менее вероятном дефекте не подтверждается.

При $F_0 < F$ следует подтверждение о существовании менее вероятного дефекта, что вызывает соответствующее сообщение в выходном листинге алгоритма.

В случае наличия кратных дефектов и определения менее вероятного дефекта на предыдущем этапе работы алгоритма диагностики [19] дополнительно осуществляется перебор менее вероятного дефекта с остальными. Выбор минимальной дисперсии остаточных невязок осуществляется из расширенного вектора дисперсий остаточных невязок D_ϵ .

При определении двойных дефектов вектор дисперсий остаточных невязок состоит из $(2N - 3)$ значений, при определении тройных дефектов – из $(2N - 5)$ значений. Анализ вектора D_ϵ проводится аналогично приведенным ранее в пунктах «Особенности одиночных дефектов» и «Особенности кратных дефектов».

Заключение

Таким образом, при работе блока диагностики всегда проверяется наличие труднораспознаваемых дефектов, что позволяет повысить надежность и эффективность блока диагностики в эксплуатации.

Библиографический список

1. Цховребов М.М., Эзрохи А.Ю., Дрыгин А.С. Применение идентифицированной математической модели газотурбинного двигателя для анализа результатов испытаний // *Авиационные двигатели и силовые установки*. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. – С. 153–159.
2. Кеба И.В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Транспорт, 1980. – 248 с.
3. Кофман В.М. Метод параметрической идентификации математических моделей ГТД на установившихся режимах работы // *Вестник Уфим. гос. авиац. техн. ун-та*. – 2009. – Т. 13, № 1 (34). – С. 57–65.
4. Ахмедзянов А.М., Дубравский Н.Г., Тунаков А.П. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. – М.: Машиностроение, 1983. – 206 с.
5. Опыт использования программы UNI_MM для выполнения термодинамических расчетов турбореактивных двухконтурных двигателей / Е.В. Марчуков, И.А. Лещенко, М.Ю. Вовк, А.А. Инюкин // *Насосы. Турбины. Системы: науч.-техн. журн.* – 2015. – № 2 (15). – С. 45–53.
6. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов [и др.]. – Киев: Техника, 1998. – 312 с.
7. Надежность, диагностика, контроль авиационных двигателей / В.Т. Шепель [и др.]; Рыбин. гос. техн. ун-т. – Рыбинск, 2001. – 352 с.
8. Advanced multivariable control systems of aeroengines / eds. S. Jianguo, V.I. Vasilyev, B.G. Ilyasov. – Beijing, China: BUAA Press, 2005. – 621 p.
9. Зубко А.И. Перспективный комплекс виброакустической диагностики подшипниковых опор авиационных газотурбинных двигателей // *Вестник Моск. авиац. ин-та*. – 2016. – Т. 23, № 1. – С. 47–55.
10. Князева В.В., Чубаров О.Ю., Неретин Е.С. Методика диагностики неисправных состояний на базе измерений контролируемых параметров при огневых испытаниях // *Вестник Моск. авиац. ин-та*. – 2014. – Т. 21, № 5. – С. 106–115.
11. Лянцев О.Д., Казанцев А.В., Абдулнагимов А.И. Метод идентификации нелинейных динамических моделей ГТД на режиме приемистости // *Динамика и виброакустика машин*. – Самара, 2016. – С. 80–81.
12. Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю., Филинов Е.П. Влияние размерности турбореактивных двигателей на выбор оптимальных параметров рабочего процесса // *Вестник Моск. авиац. ин-та*. – 2017. – Т. 24, № 4. – С. 40–45.
13. Лянцев О.Д., Абдулнагимов А.И., Казанцев А.В. Определение нелинейной динамической модели ТРДД на режиме запуска по экспериментальным данным // *Авиационная промышленность*. – 2017. – № 2. – С. 1–5.
14. Эзрохи Ю.А., Хорева Е.А. Оценка влияния неоднородности входного потока воздуха на тягу газотурбинного двухконтурного двигателя // *Вестник Моск. авиац. ин-та*. – 2018. – Т. 25, № 2. – С. 99–108.
15. Чуян Р. Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.
16. Тунаков А. Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.
17. Бойко Л. Математическая модель газотурбинного двигателя с повенцовым описанием многоступенчатого осевого компрессора и ее практическое применение // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 6. – С. 71–77.
18. Смирнов Н.Н., Ицкович А.А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
19. Statistical summary of commercial jet airplane accidents worldwide operations 1959–2010 / Boeing Commercial Airplanes. – Seattle, Washington, U.S.A., 2011.

References

1. Tskhovrebov M.M., Ezrohi A.U., Drygin A.S. Primeneniye identifitsirovannoy matematicheskoy modeli gazoturbinnogo dvigatelya dlya analiza rezultatov ispytaniy [Application of the identified mathematical

model of a gas turbine engine for analysis of test results]. Aircraft engines and power plants. TORUS PRESS, 2010, pp. 153-159.

2. Keba I.V. Diagnostika aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley [Diagnostics of aircraft gas turbine engines]. Moscow: Transport, 1980, 248 p.

3. Kofman V.M. Metod parametricheskoy identifikatsii matematicheskikh modeley GTD na ustanovivshikhsya rezhimakh raboty [Method for parametric identification of mathematical models of gas turbine engines at steady-state operating modes]. Vestnik UGATU, 2009, Vol. 13, no. 1 (34), pp. 57-65.

4. A.M. Akhmedzyanov, N.G. Dubravsky, A.P. Tunakov. Diagnostika sostoyaniya VRD po termogazodinamicheskim parametram [Diagnostics of the WFD state by thermogasdynamics parameters]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1983, 206 p.

5. Marchukov E.V., Leshchenko I.A., Vovk M.Yu., Inyukin A.A. Opyt ispolzovaniya programmy UNI_MM dlya vypolneniya termodinamicheskikh raschetov turboreaktivnykh dvukhkонтурnykh dvigateley [Experience of using the UNI_MM program to perform thermodynamic calculations of turbojet twin-contour engines]. Pumps. Turbines. Systems, 2015, No. 2 (15), pp. 45-53.

6. Epifanov S.V. Sintez sistem upravleniya i diagnostirovaniya gazoturbinnnykh dvigateley [Synthesis systems for the management and diagnosis of gas turbine engines]. Kiev: Tekhnika, 1998, 312 p.

7. Shepel V.T. Nadezhnost, diagnostika, kontrol aviatsionnykh dvigateley [Reliability, Diagnostics, Control of Aircraft Engines]. Rybinsk: RGTA, 2001, 352 p.

8. Advanced Multivariable Control Systems of Aeroengines / eds.: Sun Jianguo, V.I. Vasilyev, B.G. Ilyasov. Beijing, China: BUAA Press, 2005, 621 p.

9. Zubko A.I. Perspektivnyy kompleks vibroakusticheskoy diagnostiki podshipnikovyykh opor aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley [The prospective complex of vibroacoustic diagnostics bearing supports of aircraft gas turbine engines]. Aerospace MAI Journal, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 47-55.

10. Knyazeva V.V., Chubarov O.Y., Neretin E.S. Metodika diagnostiki neispravnykh sostoyaniy na baze izmereniy kontroliruyemykh parametrov pri ognevykh ispytaniyakh [Method of diagnosing faulty conditions based on measurements of controlled parameters in fire tests]. Aerospace MAI Journal, 2014, vol. 21, no. 5, pp. 106-115.

11. Lyantsev O.D., Kazantsev A.V., Abdunagimov A.I. Metod identifikatsii nelineynykh dinamicheskikh modeley GTD na rezhime priyemistosti [Method of identification of non-linear dynamic models of GTD on the mode of acceptance]. Journal of Dynamics and Vibroacoustics, Samara, 2016, pp. 80-81.

12. Kuzmichev V.S., Tkachenko A.Y., Filinov E.P. Vliyaniye razmernosti turboreaktivnykh dvigateley na vybor optimalnykh parametrov rabocheho protsessa [Influence of the dimension of turbojet engines on the choice of optimal parameters of the work process]. Aerospace MAI Journal, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 40-45.

13. Lyantsev O.D., Abdunagimov A.I., Kazantsev A.V. Opredeleniye nelineynoy dinamicheskoy modeli TRDD na rezhime zapuska po eksperimentalnym dannym [Definition of a non-linear dynamic model of TRDD on the start-up mode of experimental data]. Aviation industry, 2017, no. 2, pp. 1-5.

14. Ezrohi Yu.A., Horeva E.A. Otsenka vliyaniya neodnorodnosti vkhodnogo potoka vozdukha na tyagu gazoturbinnogo dvukhkонтурного dvigatelya [Assessment of the effect of heterogeneity of the input air flow on the thrust of the gas turbine two-circuit engine]. Aerospace MAI Journal, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 99-108.

15. Chuyan R. Metody matematicheskogo modelirovaniya dvigateley letatelnykh apparatov [Techniques for mathematical modeling of aircraft engines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1988, 288 p.

16. Tunakov A. Metody optimizatsii pri dovodke i proyektirovanii gazoturbinnnykh dvigateley [Optimization methods for refining and designing gas turbine engines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1979, 184 p.

17. Boyko L. Matematicheskaya model gazoturbinnogo dvigatelya s poventsovyim opisaniyem mnogostupenchatogo oseвого kompressora i yeye prakticheskoye primeneniye [Mathematical model of gas turbine engine with a venous description of the multi-stage axial compressor and its practical application]. Aerospace tech-
nic and technology, 2008, no. 6, p. 71-77.

18. Smirnov N.N., Itskovich A.A. Obsluzhivaniye i remont aviatsionnoy tekhniki po sostoyaniyu [Maintenance and repair of aviation equipment by condition]. Moscow: Transport, 1987, 272 p.

19. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations 1959–2010 / Boeing Commercial Airplanes, Seattle, Washington, U.S.A., June 2011.

Об авторах

Ахмед Хирш Салим Ахмед (Казань, Россия) – аспирант кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки» КНИТУ – КАИ им. А.Н. Туполева (420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10; e-mail: hersh_ise19@mail.ru).

Осипов Борис Михайлович (Казань, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки» КНИТУ – КАИ им. А.Н. Туполева (420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10; e-mail: obm0099@yandex.ru).

About the authors

Ahmed Heersh Saleem Ahmed (Kazan, Russian Federation) – PhD Student of Jet Engines and Power Plants Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI (10, K. Marksa st., Kazan, 420111, Russian Federation; e-mail: hersh_ise19@mail.ru).

Boris M. Osipov (Kazan, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor of Jet Engines and Power Plants Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI (10, K. Marksa st., Kazan, 420111, Russian Federation; e-mail: obm0099@yandex.ru).

Получено 19.05.2020