

лены по статистическим данным или экспертным оценкам.

Информация о техническом состоянии каждого элемента, узла или подсистемы собирается в FADEC и оценивается общее состояние силовой установки в целом с возможностью передачи информации в системы верхнего уровня.

Реализация данного подхода в САУ-КиД позволяет повышать достоверность

идентификации состояния ГТД, корректно оценивать и прогнозировать развитие системных отказов, сможет выводить ГТД в «щадящую» зону рабочей фазовой области при обнаружении отказов, эффективно принимать решения по реконфигурации системы и гарантировать работоспособность всей силовой установки во всем диапазоне внешних воздействий.

УДК 621.452

МЕТОДИКА И ОПЫТ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОМПРЕССОРОВ И ВЕНТИЛЯТОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ГТД

Кофман В.М.

Уфимский государственный авиационный технический университет

METHODS AND THE EXPERIMENT OF THE PARAMETRIC IDENTIFICATION COMPRESSORS AND FANS MATHEMATICAL MODELS OF ACCORDING TO THE RESULTS OF THE GAS TURBINE ENGINE DEVELOPMENT TEST

Kofman V.M. On the basis of the method insignificant deviations and the compressor characteristics presentation forms as a polynomial there has been worked out and tested methods of the parametric identification compressors and fans mathematical models according to the results of the gas turbine engine development test.

Процесс доводки компрессоров (вентиляторов) ГТД является сложным и требующим значительных затрат времени и средств [1]. После выполнения проекторочных газодинамических и прочностных расчетов компрессора, выпуска конструкторской документации и изготовления первого экземпляра компрессора производятся его автономные испытания на специальных компрессорных стендах ЦАГИ. По результатам этих испытаний получают математическую модель (ММ) компрессора 1 приближения I уровня сложности.

ММ компрессора I уровня сложности по определению [2] представляет собой функциональные зависимости параметров компрессора от нескольких переменных

$$\pi_k^* = f_1(G_{в.пр.}, n_{пр}, Re_k, \alpha_{на}), \quad (1)$$

$$\eta_k^* = f_2(\pi_k^*, n_{пр}, Re_k, \alpha_{на}). \quad (2)$$

Как правило, по результатам лидерных испытаний компрессора выявляется необходимость изменения геометрических параметров его лопаточных венцов и программы регулирования направляющихappa-

ратов с целью достижения более высоких значений КПД и запасов газодинамической устойчивости. Введение изменений в конструкцию и программу регулирования компрессора требует экспериментальной проверки эффективности введенных мероприятий и проведения повторных дорогостоящих автономных испытаний компрессора на специализированном стенде или специальных испытаний компрессора в системе ГТД на заводском стенде.

Неотъемлемой частью процесса доводки компрессоров является параметрическая идентификация математических моделей (ММ) компрессоров по результатам их испытаний в системе ГТД. Результаты идентификации позволяют оценить изменение ММ первого приближения и эффективность введенных конструктивных мероприятий, а использование адекватных ММ компрессоров (вентиляторов) позволяет повысить точность расчета высотно-скоростных характеристик ГТД и целенаправленно проводить последующую доводку компрессоров и других узлов двигателя.

Следует отметить, что автономные испытания компрессора на специализированном и заводском стендах позволяют получить значительную, но далеко не всю информацию о его характеристиках.

При вышеуказанных способах получения ММ компрессора, как правило, не учитывается влияние на характеристики компрессора эксплуатационных факторов [3,4] (числа Re_k , упругой раскрутки рабочих лопаток компрессора) и технологических факторов (отклонений размеров деталей проточной части компрессора в пределах допусков на изготовление). В связи с этим идентификацию ММ компрессора целесообразно выполнять по совокупности экспериментальной информации, полученной при испытаниях нескольких двигателей последней модификации, как на заводских стендах, так и на высотных стендах, при анализе которой имеется возможность выявить и учесть влияния на характеристики компрессора вышеуказанных факторов.

Алгоритм идентификации ММ компрессора по результатам стендовых испытаний ГТД должен обеспечивать систематизацию полученной при различных видах испытаний экспериментальной информации с уточнением ММ компрессора 1 приближения I уровня (уравнений вида (1) и (2)), с выявлением и оценкой различного рода отклонений и ошибок. К ним относятся отклонения величин режимного критерия подобия $n_{ю}$ при стендовых испытаниях ГТД от соответствующих величин $n_{пр}$, имеющих место при автономных испытаниях компрессора, отклонения параметров π_{ϵ}^* , η_{ϵ}^* , G_a^* , обусловленные упругой раскруткой рабочих лопаток из-за различной методики проведения эксперимента при автономных испытаниях и при испытаниях ГТД, отклонения параметров π_{ϵ}^* , η_{ϵ}^* , G_a^* , обусловленные влиянием числа Re_k [3, 4], возможные ошибки ММ компрессора, обусловленные принятой формой задания его характеристик, технологические отклонения, ошибки измерений.

В настоящей работе, являющейся развитием работы [5], изложена разработанная автором методика идентификации ММ компрессора по результатам стендовых испытаний ГТД. Методика позволяет по всей совокупности экспериментальных точек, полу-

ченных в процессе первого автономного испытания компрессора и последующих стендовых испытаний ГТД на заводском и высотном стендах, проводить идентификацию ММ компрессора с оценкой влияния введенных в компрессор конструктивных изменений и вышеуказанных отклонений и ошибок. При рассмотрении экспериментальной информации, полученной по результатам испытаний нескольких экземпляров компрессора, методика также позволяет, при $n_{пр} = idem$, оценивать величины доверительных интервалов параметров компрессора, обусловленных их разбросом из-за ошибок измерений и имеющих место отклонений размеров деталей проточной части в пределах технологических допусков на их изготовление [6].

Для извлечения полезной информации из несистематизированного множества экспериментальных точек, полученных при стендовых испытаниях ГТД и отягченных различного рода ошибками и отклонениями, и для идентификации ММ компрессора в разработанной методике используется полиномиальная форма представления характеристик компрессора и метод малых отклонений [7].

Известно, что в математической модели ГТД характеристики компрессора можно представлять аналитически в форме полиномов [8,9]. В частности, в [8] характеристики компрессора предлагается задавать в виде полиномов вида

$$\bar{\pi}_k^* = \sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^5 a_{mn} \left(\frac{\pi_k^*}{G_{в.пр}} \right)^m (\bar{n}_{пр})^n, \quad (3)$$

$$\bar{\chi} = \sum_{m=0}^2 \sum_{n=0}^5 b_{mn} \left(\frac{\pi_k^*}{G_{в.пр}} \right)^m (\bar{n}_{пр})^n, \quad (4)$$

где a_{mn} , b_{mn} – коэффициенты полиномов, которые определяют с помощью метода наименьших квадратов при аппроксимации характеристик, полученных при испытании компрессора на компрессорном стенде,

$$\bar{\chi} = \frac{\pi_{к,расч}^{*k-1} - 1}{\eta_{к,расч}^*} \cdot \frac{(\pi_{к,расч}^{*k} - 1) / \eta_{к,расч}^*}{(\pi_{к,расч}^{*k_p-1} - 1) / \eta_{к,расч}^*}.$$

Кроме того, что полиномы (3) и (4) аналитически описывают исходные характеристики конкретного экземпляра компрессора, при какой-то методике их получения и

при каких-то условиях проведения эксперимента, они также аналитически отражают относительную закономерность изменения параметров компрессора, принадлежащего к конструктивно близким экземплярам компрессоров. Под относительной закономерностью изменения параметров компрессора понимается справедливость в «малом», при $n_{пр} = n_{пр.i}$, $\pi_k^* / G_{в.пр} = idem$, зависимостей

$$(\Delta\pi_k^* / \pi_k^*)_i = f_1(\Delta n_{пр}) = idem,$$

$$(\Delta\chi / \chi)_i = f_2(\Delta n_{пр}) = idem,$$

т.е. малые относительные изменения величин π_k^* и χ при $\pi_k^* / G_{в.пр} = idem$ в окрестности i -го значения приведенной частоты вращения при изменении ее на малую величину ($\Delta n_{пр}$) идентичны для конструктивно близких экземпляров компрессоров. Приняв это допущение в области режимов работы компрессора автоточечной по числу Рейнольдса, с помощью метода малых отклонений [7] и исходных полиномов (3) и (4), (описывающих ММ компрессора первого приближения, полученную при испытании на компрессорном стенде), численно рассчитываются для каждой полученной в процессе испытания ГТД j -ой экспериментальной точки (при $\bar{n}_{пр} = \bar{n}_{пр.j}$, $(\pi_k^* / G_{в.пр}) = (\pi_k^* / G_{в.пр})_j$), коэффициенты влияния вида $(\Delta\bar{\pi}_k^* / \Delta\bar{n}_{пр})_j$, $(\Delta\bar{\chi} / \Delta\bar{n}_{пр})_j$.

Далее с помощью этих коэффициентов осуществляется «приведение» величин параметров $(\pi_k^*)_j$ и $(\chi)_j$ имеющих место при $\bar{n}_{пр} = \bar{n}_{пр.j}$ к значениям этих же параметров при i -ых заданных приведенных частотах вращения ротора $\bar{n}_{пр.i}$, при которых производилось снятие характеристик компрессора 1 приближения, и формируется ряд выборок вида

$$\bar{\pi}_{k.i}^* = f_i \left(\frac{\pi_k^*}{G_{в.пр}} \right),$$

$$\bar{\chi}_i = f_i \left(\frac{\pi_k^*}{G_{в.пр}} \right).$$

Выборки формируются при всех i -ых заданных приведенных частотах вращения $n_{пр.i}$, в зоне которых находились полученные при различных испытаниях ГТД экспе-

риментальные точки с $\bar{n}_{пр} = \bar{n}_{пр.j}$.

С целью исключения в этих выборках грубых ошибок (промахов) выборки аппроксимируются квадратичными полиномами с одновременной проверкой однородности выборок с помощью максимального относительного отклонения τ и его распределения [10]. Далее определяются доверительные интервалы выборок с помощью распределения Стьюдента [11], проверяется однородность дисперсий выборок с помощью критерия Фишера [10,12], проверяется соответствие полученных эмпирических выборок нормальному закону распределения [11]. Окончательно, после вышеописанных процедур систематизации и статистической обработки экспериментальной информации, полученные в процессе идентификации характеристики компрессора аппроксимируются с помощью метода наименьших квадратов и представляются в виде полиномов вида (3) и (4) с указанием, при заданном уровне доверительной вероятности $P = 1 - p$, величин доверительных интервалов $\Delta\bar{\pi}_{k.i}^*$ и $\Delta\bar{\chi}_i$ и величин средневзвешенных дисперсий $S_{\bar{\pi}}^2$ и $S_{\bar{\chi}}^2$. Таким образом, кроме детерминированного аналитического описания математических ожиданий уточненных характеристик компрессора полиномами вида (3) и (4), при обработке результатов испытаний нескольких конструктивно единых компрессоров, может быть также получена статистическая оценка рассеивания параметров $\bar{\pi}_k^*$ и $\bar{\chi}$, обусловленного ошибками измерений и отклонением деталей компрессора в пределах технологических допусков на изготовление. Разработанная методика идентификации ММ компрессора реализована в виде программы для ЭВМ и апробирована при идентификации ММ компрессора ТРД «А», ММ компрессора ТРД «Б», ММ вентилятора двухконтурного ГТД «Х» по результатам испытаний этих двигателей на заводском и высотном стендах. В результате идентификации получены ММ компрессоров «А», «Б» и вентилятора «Х», соответствующие их последним конструктивным компоновкам, выявлено влияние на параметры компрессоров и вентилятора упругой раскрутки рабочих лопаток и числа Re_k .

Библиографический список

1. Комиссаров Г.А., Русаков Ю.Н. Идентификация математической модели компрессора для целей доводки. Испытания авиационных двигателей. - Уфа: УАИ, 1982. № 10. - С. 139–145.
2. Тунаков А.П. Классификация математических моделей ГТД. I. Изв. высш. учебн. заведений. Авиационная техника, 1986. № 4. - С.99-101.
3. Литвинов Ю.А., Боровик В.О. Характеристики и эксплуатационные свойства авиационных турбореактивных двигателей. - М.: Машиностроение, 1979. - 288 с.
4. Боровик В.О., Ланда В.Ш. Механизм влияния эксплуатационных факторов на характеристики элементов ГТД. Испытания авиационных двигателей. - Уфа: УАИ, 1985. №13. - С. 3 –8.
5. Кофман В.М. Применение метода малых отклонений и полиномиальной математической модели компрессора для уточнения его характеристик по результатам стендовых испытаний ГТД. Межвуз.науч.сб. Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей. - Уфа: УГАТУ, 1992. №15. - С.100-109.
6. Бочкарев С.К., Кулагин В.В., Полукеев С.П. Оценка разброса величин, описывающих характеристики узлов серийных ГТД.

Некоторые вопросы расчета и экспериментального исследования высотно-скоростных характеристик ГТД. ЦИАМ. Труды №839. Сб. статей. 1979. Вып.6. - С. 268 – 272.

7. Черкез А.Я. Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений. - М.: Машиностроение, 1975. - 380с.

8. Гумеров Х.С., Гаврилов А.С., Магадеев А.Я., Магадеева Р.Ш., Мустакимова Н.Б. Аппроксимация характеристик компрессора двухпараметрическими полиномами и применение их в математических моделях ГТД. Некоторые вопросы расчета и экспериментального исследования высотно-скоростных характеристик ГТД. - ЦИАМ, Труды №839. Сб. статей. 1979. Вып.6. - С 183 – 192.

9. Бакулев В.И. и др. Представление характеристик компрессора в координатах, удобных для расчета на ЭВМ параметров ГТД. Изв. вузов. Авиационная техника, 1977. № 3. - С.114–117.

10. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. - М.: Наука, 1968. - 288 с.

11. Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. - М.: Наука, 1974. - 108 с.

12. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976. - 279 с.

УДК 593.3

ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛАСТИН С НЕСКВОЗНЫМИ ТРЕЩИНАМИ ПЕРЕМЕННОЙ ГЛУБИНЫ В ПЛОСКОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Степанов С.Л.¹, Яковлев А.С.²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет

²ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

ULTIMATE STATE OF THE PLATES WITH BLIND FRACTURE OF VARIABLE DEPTH IN THE PLANE TAUT STATE

Stepanov S.L., Yakovlev A.S. On the basis of solving marginal problem for the scratch of invariable depth in Dugdale's approximation the areas of ultimate states of the thin plate with such a scratch were set up and the boundary between them was determinate in this work [1]. In the process of operation however the external loads which change cyclically close to their nominals act upon the thin-walled elements of the constructions. As a result of that primarily rectilinear front of the scratch becomes distorted and a fatigue scratch with variable depth appears.

В случае плоского напряженного состояния можно считать, что длина царапины $2l$ много больше толщины пластины h

($2l \gg h$), и с достаточной степенью точности аппроксимировать глубину царапины кривой второго порядка в виде (см. рис. 1):