Уфа: УГАТУ, 2009 Вестник УГАТУ Т.12, №2(31). С. 11–13

УДК 629.7.036

Х. С. ГУМЕРОВ, А. А. ВОЛИК, Р. Б. ХАЙРУЛЛИН

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ПРИЕМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Рассматривается методика оптимальной отладки двигателей на этапе приемо-сдаточных испытаний. Исследование основано на данных, полученных в серийном производстве. *Авиационный газотурбинный двигатель ; приемо-сдаточные испытания ; оптимизация*

ВВЕДЕНИЕ

На этапе серийного производства газотурбинных двигателей проявляется определенный разброс характеристик и свойств, связанный с естественным рассеиванием геометрических размеров при изготовлении деталей и сборке узлов в пределах допусков, предусмотренных техническими условиями (ТУ), рассеивание имеют характеристики и свойства покупных агрегатов системы автоматического управления. В результате значения параметров (тяги P, удельного расхода топлива $C_{уд}$, температуры газов перед турбиной $T_Г^*$ и т. д.) могут не удовлетворять нормам ТУ.

В серийном производстве для приведения значений параметров в нормы ТУ используется процесс отладки, причем к отладке предъявляется следующее дополнительное требование: параметры, за счет которых производится регулирование, должны принадлежать своим допустимым диапазонам.

Целью данной работы является поиск приемлемого метода оптимальной отладки двигателей на этапе приемо-сдаточных испытаний с помощью двух основных факторов, используемых в серийном производстве двухвального ТРДД с регулируемым соплом: степени понижения давления в турбине $\pi_Т$ и частоты вращения ротора низкого давления n_1.

МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОЙ ОТЛАДКИ

На основе данных, полученных в серийном производстве, можно сделать вывод, что в отладке нуждаются около 40% вновь изготовленных двигателей.

Контактная информация: (347)273-79-54

Очевидно, что при использовании двух регулирующих параметров $\pi_Т$ и n_1 возможны следующие варианты:

1) регулирование $\pi_Т$ при некотором постоянном значении n_1;

2) регулирование n_1 при некотором постоянном значении $\pi_Т$;

3) одновременное регулирование $\pi_Т$ и n_1.

Выполнен анализ этих вариантов. Выводы основываются на статистических материалах результатов приемо-сдаточных испытаний серийных двигателей и расчетах, выполненных в системе MatLab [1]. Изменение основных параметров двигателя при расчетах определяется с помощью метода малых отклонений. Суть метода заключается в том, что зависимость основных параметров двигателя от независимых переменных (в данном случае этими переменными являются степень понижения давления в турбине и частота вращения ротора низкого давления) представляется в виде линейной модели:

$$X_{отл} = X_{исх} + \frac{\partial X}{\partial n_1}\Delta n_1 + \frac{\partial X}{\partial \pi_Т}\Delta \pi_Т , \qquad (1)$$

где $X_{отл}$, $X_{исх}$ – соответственно отлаженные и исходные параметры двигателя; $\partial X / \partial n_1$ и $\partial X / \partial \pi_Т$ – коэффициенты влияния; Δn_1 – изменение частоты вращения ротора низкого давления; $\Delta \pi_Т$ – изменение степени понижения давления в турбине.

В исследовании используются расчетно-экспериментальные коэффициенты влияния.

Необходимо отметить, что использование метода малых отклонений оправдано тем, что величины отклонений параметров, требующих корректировки, достаточно малы по сравнению с самими параметрами.

Функцией цели при оптимизации отладки параметров двигателя является следующее условие: сумма квадратов отклонений заданных $i=1...k$ параметров от требуемых, в рассматриваемом случае среднестатистических значений $X_{\text{ср}}$, должна быть минимальна. Задача в математической постановке имеет следующий вид:

$$n_{1\min} \le n_{1\text{отл}} \le n_{1\max}; \quad (2)$$

$$\pi_{\text{Tmin}} \le \pi_{\text{Totл}} \le \pi_{\text{Tmax}}; \quad (3)$$

$$X_{1\min} \le X_{1\text{отл}} \le X_{1\max}; \quad (4)$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$X_{k\min} \le X_{k\text{отл}} \le X_{k\max};$$

$$\sum_{i=1}^{k}(X_{i\text{отл}} - X_{i\text{ср}})^2 \to \min. \quad (5)$$

Исследование отладки проводилось только для трех основных параметров: тяги, удельного расхода топлива и температуры газов перед турбиной. В качестве исходных, условно считающихся «до отладки», приняты данные, полученные по серийной технологии отладки, т. е. фактически соответствующие действующим нормам ТУ.

Критериями эффективности метода является среднеквадратичное отклонение (СКО) параметров и их принадлежность к допустимым нормам ТУ [2]. Результаты расчета приведены в таблице.

Таблица

Результаты расчета

	СКО P	СКО $C_{\text{уд}}$	СКО T_{Γ}^{*}	Доля двигателей, не соответствующих ТУ, %
Исходные данные	59,5	0,0086	14,0	0
1 вариант	92,3	0,0079	14,9	14 (10 по P, 1 по $C_{\text{уд}}$, 3 по T_{Γ}^{*})
2 вариант	95,4	0,0076	13,6	14 (9 по P, 2 по $C_{\text{уд}}$, 3 по T_{Γ}^{*})
3 вариант	19,8	0,0051	10,4	0
4 вариант	11,4	0,0045	14,0	0

Как видно из таблицы, результаты, полученные при выполнении отладки одним только регулирующим параметром, не удовлетворяют поставленным условиям, использование первых двух вариантов неприемлемо.

Анализируя поставленную задачу для 3-го варианта, можно сделать вывод, что это типичная задача квадратичного программирования.

Результаты отладки по 3-му варианту представлены в виде гистограмм параметров до и после оптимизации отладки на рис. 1 и 2. Для наглядности гистограммы распределений одноименных параметров помещены друг над другом с одинаковым масштабом. Как видим, новые значения параметров лежат в допустимых диапазонах и, кроме того, их отклонения от среднестатистических значений уменьшились для всех параметров, для которых проводилась отладка.

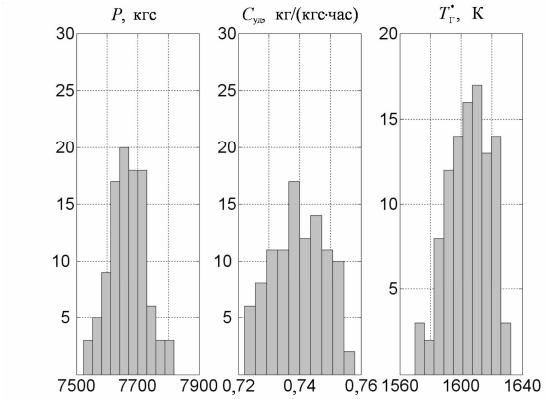


Рис. 1. Распределение регулируемых параметров до отладки

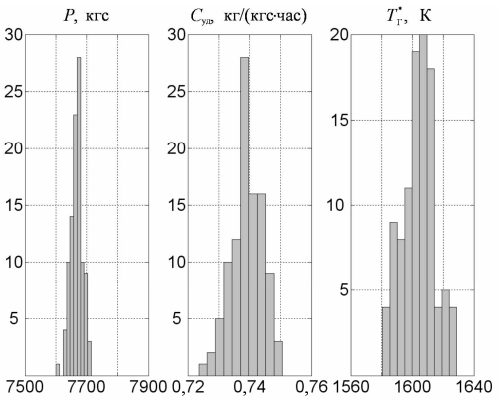


Рис. 2. Распределение регулируемых параметров после отладки

В соответствии с условиями (2) и (3) регулирующие параметры остаются в существующих пределах, однако характер распределения их меняется: от близкого к нормальному в существующем варианте к более равномерному при оптимальной отладке (предпочтительнее отладка с более высокой частотой вращения). Распределение регулирующих параметров до и после отладки представлено на рис. 3 и 4.

Для тяги и удельного расхода эти коэффициенты, допустим, равны 1, для менее значимых, некритичных параметров они могут быть меньше 1. Такая задача в математической фор-

мулировке будет иметь вид, совпадающий с зависимостями (2–4), и только условие (5) будет изменено:

$$\sum_{i=1}^{k} W_i (X_{i\text{отл}} - X_{i\text{ср}})^2 \to \min, \qquad (5')$$

где W_i – весовой коэффициент i-го параметра.

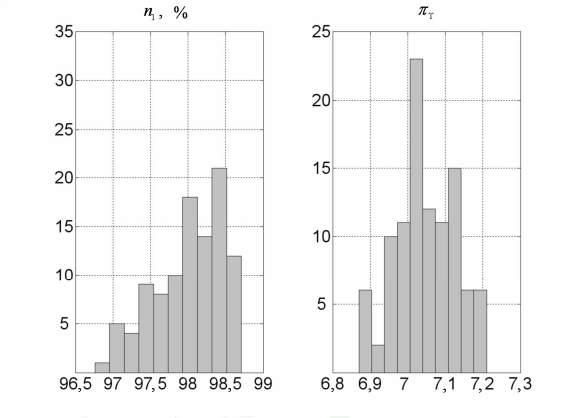


Рис. 3. Распределение регулирующих параметров до отладки

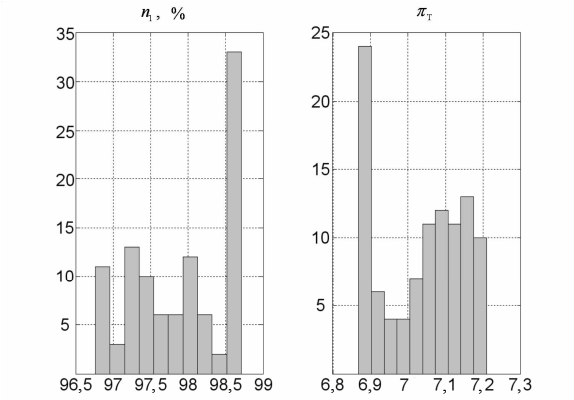


Рис. 4. Распределение регулирующих параметров после отладки

Так, уменьшив вес параметра $T^*_Г$ до 0,1 (вариант 4), можно оставить исходную величину СКО 14К, при этом СКО других параметров еще более сократятся. Характеристика распределения параметров отражает, кроме всего прочего, погрешности регистрации и последующей обработки параметров приведения к стандартным атмосферным условиям с учетом отнесения (пересчета) к номинальным значениям регулирующих параметров, например n_1. Т. е. можно ожидать, что фактическое распределение окажется несколько отличным от приведенных на рис. 1 и 2. В этом смысле предлагаемая оптимизация повышает гарантию соответствия параметров нормам технических условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из всего вышеизложенного следует, что метод позволяет проводить более качественную отладку двигателей. За счет сужения диапазона рассеивания основных параметров повышаются функциональные качества двигателей, повышается надежность. Автоматизированная программа оптимальной отладки не только не повышает, но даже сокращает трудоемкость испытаний, сокращая число возможных регулировок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мартынов, Н. Н.** Введение в MATLAB 6 / Н. Н. Мартынов. М. : КУДИЦ–ОБРАЗ, 2002. 352 с.

2. **Письменный, Д. Т.** Конспект лекций по теории вероятностей, математической статистике и случайным процессам / Д. Т. Письменный. М. : Айрис–Пресс, 2008. 288 с.

ОБ АВТОРАХ



Гумеров Хайдар Сагитович, проф. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1958). Д-р техн. наук по тепл. двигателям ЛА (УАИ, 1988), заслуж. деятель науки и техники РБ. Иссл. в обл. проектир. и доводки авиац. двигателей.



Волик Андрей Александрович, асп. той же каф. Дипл. инж. по авиац. двиг. и энергоустановкам (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. проектир. и доводки авиац. двиг.



Хайруллин Руслан Борисович, студ. каф. авиац. двигателей по спец. «Авиационные двигатели и энергетические установки».