

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ СЕРИЙНЫХ ГТД

© 2008 С. К. Бочкарёв

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрены способы контроля качества измеряемых параметров и отбраковки аномальных измерений при автоматизации серийных ГТД. Они основаны на использовании статистических данных о величине естественного разброса параметров серийных двигателей и закономерностях взаимосвязей отклонений различных параметров в пределах разброса.

Разброс параметров, корреляция, оценка параметра, грубая ошибка измерения.

Большое значение для адекватной интерпретации результатов испытаний газотурбинных двигателей (ГТД) имеет качество исходной информации. В частности, значения измеренных параметров, используемых при анализе результатов испытания, не должны содержать грубых ошибок. С целью поиска и отбраковки параметров, измеренных с грубой ошибкой, при автоматизации испытаний ГТД обычно используются следующие способы контроля качества измерений: многократный опрос измерительных каналов и отбраковка аномальных измерений методами математической статистики; проверка попадания измеренного значения какого-либо параметра в область допустимых значений; сравнительный анализ полученного по ре-

зультатам измерений и априорно заданного радиального поля температур (давлений) газового потока; использование обобщенных закономерностей изменения измеряемых параметров и заданных допусков на возможные отклонения от них. При испытаниях серийных ГТД появляется возможность использования дополнительных, более точных способов контроля качества измерений, основанных на использовании величин и закономерностей разброса параметров.

Дроссельные характеристики серийных двигателей одной серии имеют определённый разброс (рис. 1), который вызван рассеиванием параметров, характеризующих работу узлов двигателя, наблюдающимся из-за того, что изготовление деталей и сборка уз-

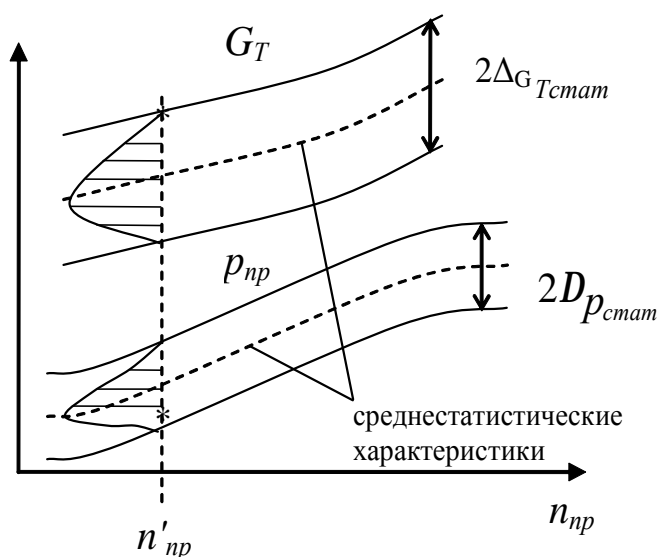


Рис. 1. Поле дроссельных характеристик серийных двигателей:

----- — среднестатистические характеристики;

* — результаты определения параметров у данного двигателя

лов осуществляется с определенными допусками, а также погрешностью измерения параметров при испытании.

Рассеивание характеристик отдельных не отлаженных двигателей подчиняется закону распределения, близкому к нормальному.

При контроле качества экспериментального определения параметров у данного двигателя на режиме, характеризуемом частотой вращения ротора n'_{np} , вначале определяются среднестатистические значения параметров двигателей всей серии на данном режиме:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n},$$

где n – количество дроссельных характеристик, имеющих в статистике.

Вычисляется дисперсия параметров двигателей данной серии на этом режиме:

$$S_P^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n - 1}.$$

Рассчитывается доверительный интервал

$$D_{D_{\tilde{P}}} = tS_P \sqrt{1 + \frac{1}{n}},$$

где $t_{1-\frac{\alpha}{2}, f}$ – квантиль распределения P , соответствующий доверительной вероятности $p=1-\alpha$ и числу степеней свободы $f=n-1$.

Проверяется условие

$$|\bar{D} - D_i| \leq D_{D_{\tilde{P}}}.$$

Если для какого-либо параметра это условие не выполняется, то он признается определенным с грубой ошибкой. Такой способ контроля качества измерений позволяет выявлять грубые ошибки измерений, превышающие 5...6 %.

Величину доверительного интервала, применяемого для поиска грубых ошибок определения параметров, можно уменьшить, если использовать для этих целей закономерности изменений параметров в пределах разброса. Эти закономерности могут быть представлены корреляционными связями между различными параметрами двигателей данной серии на постоянном режиме. Пример двумерных корреляционных связей между значениями тяги P_{np} и расхода топлива $G_{T np}$ на режиме $n'_{np} = \text{const}$ приведён на рис. 2.

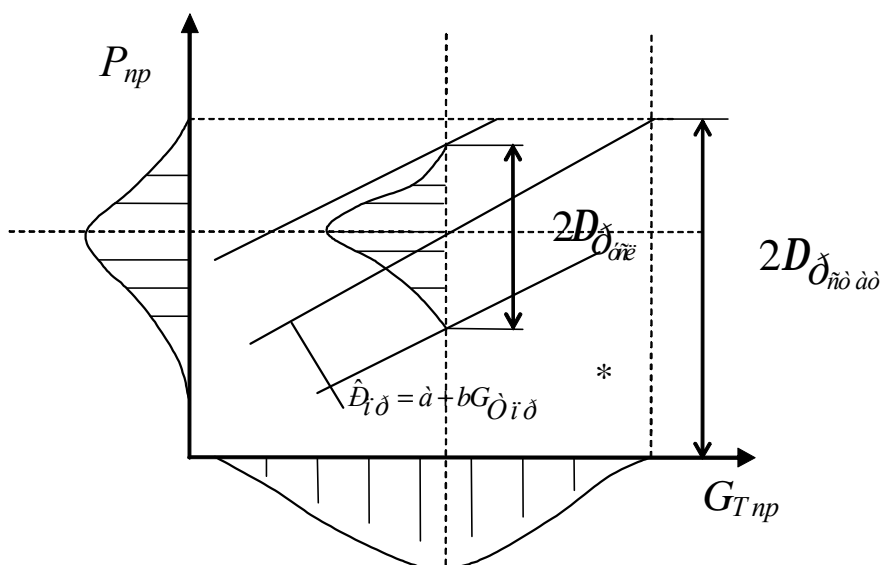


Рис. 2. Корреляционная связь P_{np} с $G_{T np}$ для двигателей данной серии при $n'_{np} = \text{const}$.
* – экспериментальная точка исследуемого двигателя

Зависимость оценки наиболее вероятного значения параметра-функции $\hat{D}_{i\delta}$ от параметра аргумента G_{Tnp} определяется уравнением регрессии

$$\hat{D}_{i\delta} = a + bG_{i\delta},$$

где a и b – коэффициенты уравнения регрессии.

Степень тесноты корреляционной связи оценивается величиной коэффициента парной корреляции r

$$0 \leq |r| \leq 1,$$

а возможное отличие действительных значений параметра-функции P_{np} у данного двигателя от оценки $\hat{D}_{i\delta}$, определённой по уравнению регрессии при известном значении $G_{m,np}$, характеризуется величиной условного доверительного интервала $D_{\delta\delta\hat{n}\bar{e}}$, который может изменяться в диапазоне

$$0 \leq D_{\delta\delta\hat{n}\bar{e}} \leq D_{P_{стат}}.$$

Величины коэффициента корреляции r условного доверительного интервала $D_{P_{усл}}$ связаны между собой соотношением

$$D_{P_{усл}} = D_{P_{стат}} \sqrt{1 - r^2}.$$

Величины коэффициентов корреляции r и регрессии a и b рассчитываются методами математической статистики по имеющимся результатам испытаний двигателей данной серии.

Коэффициенты парной корреляции между различными параметрами газотурбинных двигателей в пределах разброса принимают значения $r = 0,3 \dots 0,9$.

Для контроля качества измерений параметров с использованием закономерностей их разброса осуществляется сравнение подозрительной экспериментальной величины какого-либо параметра (в нашем случае P_{np}) с его оценкой по другому измеряемому параметру (в нашем случае по G_{Tnp}), полученной

с помощью соответствующего уравнения регрессии.

Если при этом не выполняется условие

$$|\hat{D}_{i\delta} - D_{i\delta}| \leq D_{\delta\delta\hat{n}\bar{e}},$$

то параметр признается определённым с грубой ошибкой. Такой способ контроля качества измерения позволяет выявить ошибки измерения параметров, которые не могли бы быть найдены предыдущим способом, основанным на проверке попадания вновь полученных экспериментальных точек в поле разброса характеристик двигателя данной серии.

Чувствительность метода можно повысить, если для поиска аномальных измерений использовать не двухмерные, а многомерные корреляционные связи, описываемые уравнениями регрессии вида

$$\hat{P}_{i\delta} = a + b G_{m,np} + c T_{m,np}^* + \dots,$$

которые позволяют получить оценку величин какого-либо параметра по значениям всех остальных измеряемых параметров двигателя. Такой способ контроля требует применения более сложного алгоритма, так как отличие оценки $\hat{P}_{i\delta}$ от экспериментально определённой величины P_{np} , превышающее величину $D_{\delta\delta\hat{n}\bar{e}}$, может быть вызвано грубой ошибкой определения не только параметра-функции, но и какого-либо из параметров-аргументов. Однако он позволяет снизить порог выявленных грубых ошибок измерения до величины 3...4 %.

Все описанные способы контроля качества измерений применяются в реальном масштабе времени, т.е. во время между измерениями параметров на двух соседних экспериментальных точках.

Таким образом, используя закономерности значения параметров серийных двигателей в пределах естественного разброса, можно существенно повысить достоверность экспериментальных данных, используемых для дальнейшей интерпретации результатов испытаний.

PARAMETER MEASUREMENT QUALITY CONTROL IN AUTOMATED TESTING OF SERIES GAS TURBINE ENGINES

© 2008 S. K. Botchkaryov

Samara State Aerospace University

The paper deals with methods of controlling the quality of parameters measured and rejecting anomalous measurements in automated testing of series gas turbine engines. The methods are based on the use of statistical data on the magnitude of natural spread in the parameters of series engines and on the regularity of interrelations of deviations of various parameters within the spread.

Spread in parameters, correlation, parameter evaluation, gross error of measurement.

Информация об авторе

Бочкарёв Сергей Константинович, заместитель проректора по науке и инновациям, к.т.н., доцент, СГАУ. Область научных интересов: теория и испытания двигателей, автоматизация научных исследований, организация научных исследований.

Botchkaryov, Sergei Konstantinovitch, deputy pro-rector on science and innovations, candidate of technical science, associate professor, SSAU. Area of research: theory and testing of engines, automation of scientific research, organization of scientific research.