

## 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-

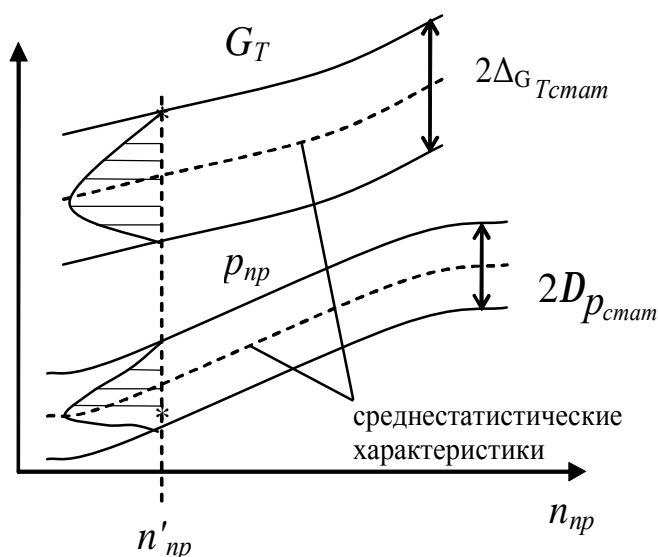


Рис. 1. Поле дроссельных характеристик серийных двигателей:

---- — 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  $n'_{npT}$ , 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

$$D_{P_{стат}} = tS_P \sqrt{1 + \frac{1}{n}},$$

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

$$|\bar{P} - P_i| \leq D_{P_{стат}}.$$

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.

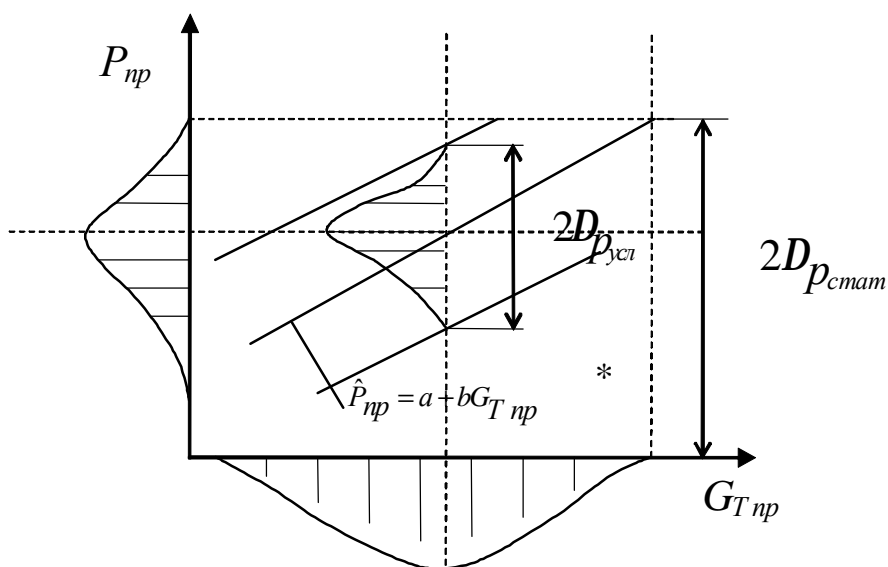


Рис. 2. Корреляционная связь  $P_{np}$  с  $G_{T np}$  для двигателей данной серии при  $n'_{np} = \text{const}$ .  
\* – экспериментальная точка исследуемого двигателя

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

$$\hat{P}_{np} = a + bG_{Tnp},$$

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  $\hat{P}_{np}$ , определённой по уравнению регрессии при известном значении  $G_{mnp}$ , характеризуется величиной условного доверительного интервала  $D_{P_{усл}}$ , который может изменяться в диапазоне

$$0 \leq D_{P_{усл}} \leq D_{P_{стат}}.$$

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

$$|\hat{P}_{np} - P_{np}| \leq D_{P_{усл}},$$

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

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

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  $\hat{P}_{np}$  от экспериментально определённой величины  $P_{np}$ , превышающее величину  $D_{P_{усл}}$ , 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.

### **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.