

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗБРОСА ПАРАМЕТРОВ ДВУХВАЛЬНЫХ ДВУХКОНТУРНЫХ И ТРЕХВАЛЬНЫХ ТУРБОВИНТОВЕНТИЛЯТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2004 С. К. Бочкарев, В. В. Кулагин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Приведены дорожки разброса параметров, полученные по результатам испытаний ста серийных двухвальных турбореактивных двухконтурных двигателей (ТРДД). Изложены результаты исследования закономерностей разброса параметров двухвальных ТРДД и перспективных трехвальных турбовинтовентиляторных двигателей (ТВВД) со сверхбольшой степенью двухконтурности.

Вопросы исследования разброса параметров неизбежно возникают при разработке методов диагностики состояния газотурбинных двигателей, при опытной доводке двигателя, при сдаточных испытаниях на серийных заводах, в ходе эксплуатации.

Статистическая обработка результатов испытаний большого числа газотурбинных двигателей различных типов и схем показывает, что разброс параметров двигателей одной серии достигает значительной величины (здесь и далее речь идет о параметрах, приведенных к стандартным атмосферным условиям (САУ)). Например, по результатам ис-

пытаний ста серийных двухвальных ТРДД [1] (температура газа перед турбиной на взлетном режиме  $T_{Г0}^* = 1330 \text{ K}$ , суммарная степень повышения давления  $\pi_{\kappa\Sigma} = 18$ , степень двухконтурности  $m = 1$ ) разброс параметров при постоянной частоте вращения ротора высокого давления  $n_{ВД} = const$  достигает  $\pm 3\%$  по тяге  $P$ ,  $\pm 2,8\%$  - по температуре газа за турбиной  $T_T^*$ ,  $\pm 2,5\%$  - по удельному расходу топлива  $C_{уд}$ ,  $\pm 3,5\%$  - по частоте вращения ротора НД  $n_{НД}$  (рис. 1).

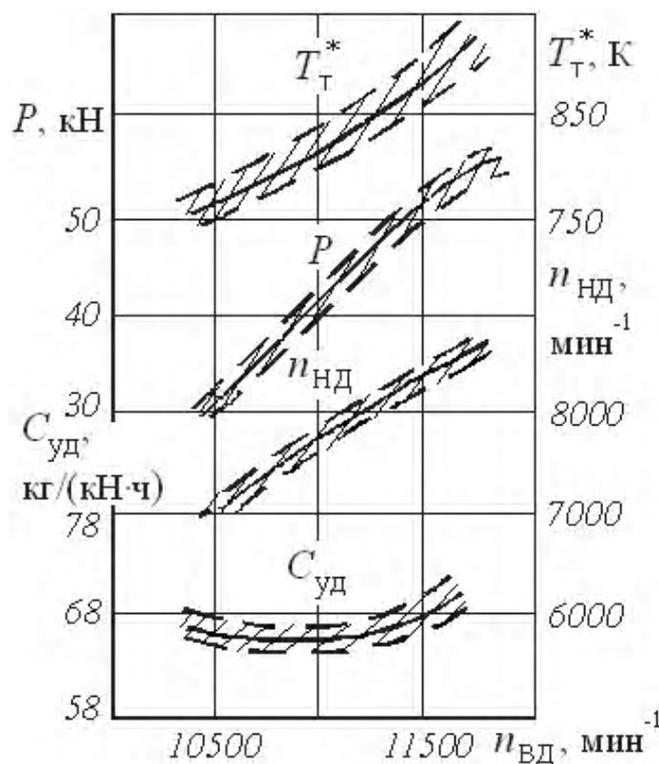


Рис. 1. Дорожки разброса по результатам испытаний ста серийных двигателей

Анализ результатов этих испытаний показал, что рассеивание параметров в пределах дорожки разброса обычно подчиняется закону нормального распределения [1]. Причем отклонения от номинальных значений различных параметров одного и того же двигателя взаимосвязаны: между ними существует связь, обусловленная совместной работой узлов. Однако причину определенного изменения параметров двигателя в пределах дорожки разброса путем термогазодинамического анализа результатов испытаний серийных двигателей найти затруднительно, так как влияние производственных отклонений на параметры двигателя лежат в пределах точности измерений, а проточная часть этих двигателей обычно недостаточно препарирована. Поэтому закономерности разброса параметров анализировались путем математического моделирования разброса, соответствующего условиям серийного производства и эксплуатации двигателей, в том числе с наличием дефекта в одном из узлов двигателя.

Суть математического моделирования заключается в том, что отклонения КПД узлов и коэффициентов потерь от их номинальных значений задаются датчиком случайных чисел; диапазоны изменения КПД принимаются разными для различных узлов, а их величина оценивается экспертно; соответствующие параметры двигателя определяются с помощью его линейной математической модели.

В качестве объекта исследования приняты двухконтурный ТРДД с параметрами рабочего процесса, близкими к параметрам двигателя ПС-90, и перспективный трехвальный ТВВД с высокими параметрами рабочего процесса ( $T_{Г0}^* = 1520 \text{ K}$ ,  $\pi_{кΣ0}^* = 28,85$ ,  $m = 16,6$ ).

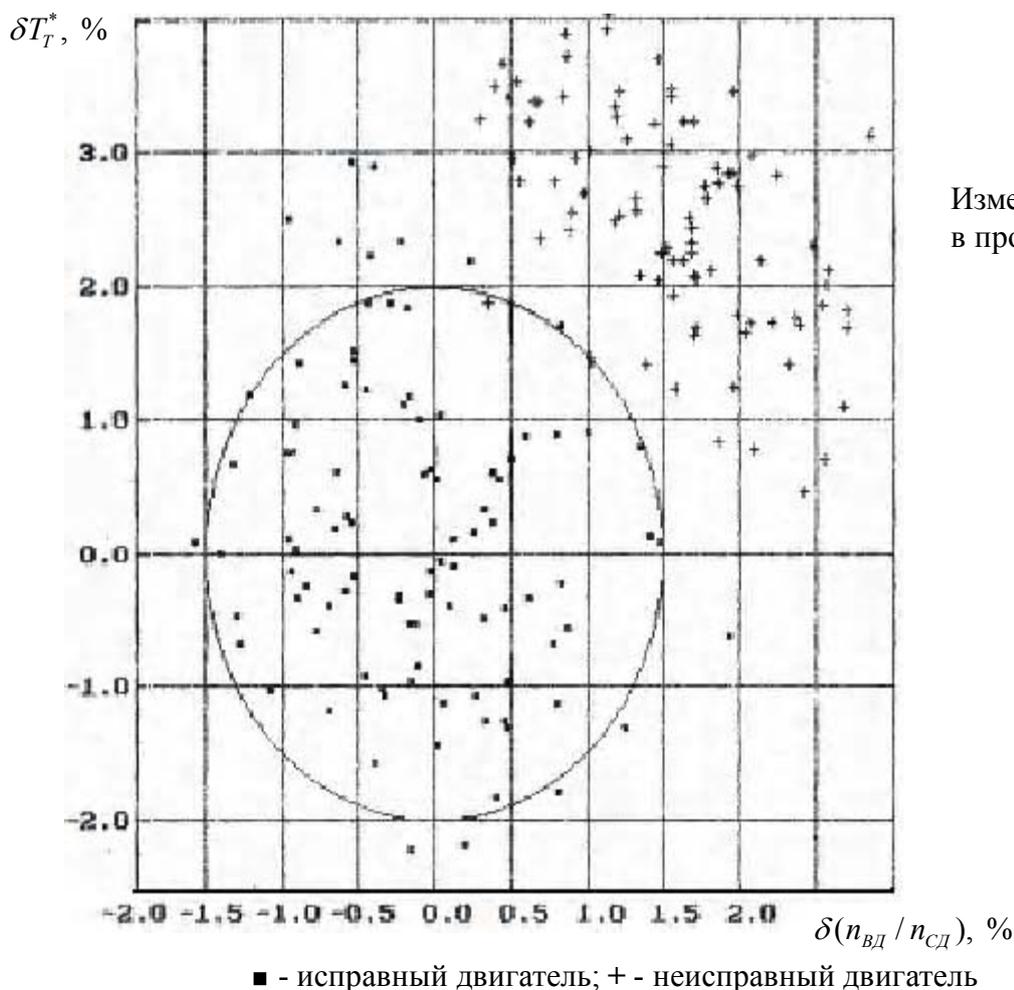
Предварительный анализ результатов моделирования разброса параметров двухвальных ТРДД и трехвальных ТВВД показал, что изменение параметров двигателя в пределах дорожки разброса целесообразно рассматривать в зависимости от скольжения частот вращения роторов, так как оно заметно изменяется при изменении КПД любого узла

и, кроме того, может быть замерено с высокой точностью.

Установлено, и это главное, что отклонению от номинального значения КПД узлов газогенератора и турбовентилятора двухвального ТРДД соответствуют две группы корреляционных зависимостей параметров двигателя от скольжения частот вращения роторов. Кроме того, установлено, что эти зависимости целесообразно рассматривать при условии постоянной тяги, так как в этом случае они отличаются не только количественно, но и качественно: снижение КПД узлов газогенератора ведет к уменьшению скольжения частот вращения роторов, а снижение КПД узлов турбовентилятора ведет к увеличению скольжения, хотя в обоих случаях удельный расход топлива, температура газа за турбиной и ряд других параметров двигателя повышаются. Таким образом, отклонения от номинальных значений КПД узлов газогенератора и турбовентилятора формируют четыре группы двигателей, существенно отличающихся по тепловому состоянию, экономической эффективности и газодинамической надежности.

Предварительный анализ показал также, что закономерности разброса параметров двухвального ТРДД являются частным случаем закономерностей, присущих трехвальному двигателю. Поэтому далее приводятся результаты моделирования для трехвального двигателя.

На рис. 2 показан разброс температуры газа за турбиной, полученный по результатам модельных испытаний ста ТВВД при условии  $P = const$  и построенный по скольжению частот вращения роторов  $n_{ВД} / n_{СД}$  (отношение частот вращения роторов высокого и среднего давлений (ВД и СД)). В результате математической обработки более пятисот графиков такого типа выявлены зависимости изменения часового и удельного расходов топлива, температуры и давления рабочего тела в различных сечениях двигателя, суммарного расхода воздуха и степени двухконтурности от скольжения частот вращения роторов. Такие зависимости для удельного расхода топлива показаны на рис. 3, а; 3, б; и



Изменения КПД узлов в процентах:

- $\eta_{BB1} = +1,62$
- $\eta_{BB2} = +0,87$
- $\eta_{КСД} = -3,78$
- $\eta_{кВД} = +0,67$
- $\eta_{мВД} = +0,73$
- $\eta_{мСД} = -0,51$
- $\eta_{мВВ} = +0,79$

Рис. 2. График разброса температуры газа за турбиной  $T_T^*$  по скольжению  $n_{ВД} / n_{СД}$  при  $P = const$

3, в. Зависимости других параметров от скольжения частот вращения роторов имеют аналогичный характер.

При анализе корреляционных зависимостей следует иметь в виду, что снижение КПД любого узла двигателя при условии сохранения постоянной тяги ведет к увеличению расхода топлива через двигатель, соответственно увеличиваются удельный расход топлива и температура газа в различных сечениях турбины. Проанализируем влияние КПД узлов на скольжение частот вращения роторов.

Снижение КПД компрессора (турбины) ВД ведет к уменьшению частоты вращения ротора  $n_{ВД}$ , уменьшению пропускной способности сечения за компрессором СД, т. е. к дросселированию компрессора СД и повышению работы, потребной для его вращения. Это приводит, в свою очередь, к уменьшению частоты вращения ротора СД, хотя и менее

значительному. Поэтому уменьшаются все три скольжения частот вращения роторов  $n_{ВД} / n_{СД}$ ,  $n_{СД} / n_{ВВ}$ ,  $n_{ВД} / n_{ВВ}$ . Анализ показывает, что на корреляционных зависимостях температуры и давления рабочего тела во всех сечениях двигателя, часового и удельного расходов топлива, а также степени двухконтурности от всех трех скольжений частот вращения роторов эти двигатели «лежат» в левом верхнем углу на сплошной линии или вблизи от нее (рис. 3, а; 3, б и 3, в). Кроме пониженной эффективности они характеризуются повышенной теплонапряженностью узлов горячей части и уменьшенными запасами газодинамической устойчивости компрессоров ВД и СД, а также вентилятора. При сдаче таких двигателей в эксплуатацию во многих случаях требуется переборка узлов газогенератора (компрессора ВД или его турбины). Поэтому при разработке технических условий на сдачу двигателей в эксплуатацию

целесообразно предусматривать минимальные минусовые допуски на отклонение скольжений частот вращения роторов от их номинальных значений.

При снижении КПД вентилятора или его турбины уменьшается частота вращения ротора турбовентилятора, а частоты  $n_{ВД}$  и  $n_{СД}$  увеличиваются из-за повышения температуры газа перед турбиной. Поэтому по крайней мере два скольжения  $n_{ВД} / n_{ВВ}$  и  $n_{СД} / n_{ВВ}$  увеличиваются, а величина  $n_{ВД} / n_{СД}$  изменяется незначительно, поскольку эффективность узлов высокого и среднего давления не изменяются, а температура газа одинаково изменяется как перед турбиной ВД, так и перед турбиной СД. На корреляционных зависимостях  $T_i^*$ ,  $p_i^*$ ,  $G_T$ ,  $C_{y\partial}$ ,  $m$  и других параметров от скольжений  $n_{ВД} / n_{ВВ}$  и  $n_{СД} / n_{ВВ}$  двигатели со сниженными КПД узлов турбовентилятора «лежат» в правом верхнем углу на штрихпунктирной линии или близко к ней (рис. 3, а и 3, в). Положение линий совмести-

ной работы узлов на характеристиках компрессоров ВД и СД этих двигателей не изменяется. Поэтому, если температура газа в проточной части турбины и удельный расход топлива не выходят за пределы допустимых значений, то эти двигатели можно сдать в эксплуатацию без переборки, отладив их за счет изменения в пределах допуска частот вращения роторов. Для этого необходимо расширить плюсовой допуск на частоты вращения роторов высокого и среднего давления.

При снижении КПД компрессора (или турбины) СД уменьшается частота вращения ротора СД. Уменьшается и величина  $n_{ВВ}$ , как вследствие дросселирования вентилятора, так и, главным образом, вследствие увеличения степени двухконтурности, но она (величина  $n_{ВВ}$ ) уменьшается менее значительно, чем  $n_{СД}$ . Частота вращения  $n_{ВД}$  увеличивается из-за увеличения температуры  $T_{Г}^*$ . В результате скольжение роторов  $n_{СД} / n_{ВВ}$  уменьшается, а  $n_{ВД} / n_{СД}$  и  $n_{ВД} / n_{ВВ}$  увеличивают-

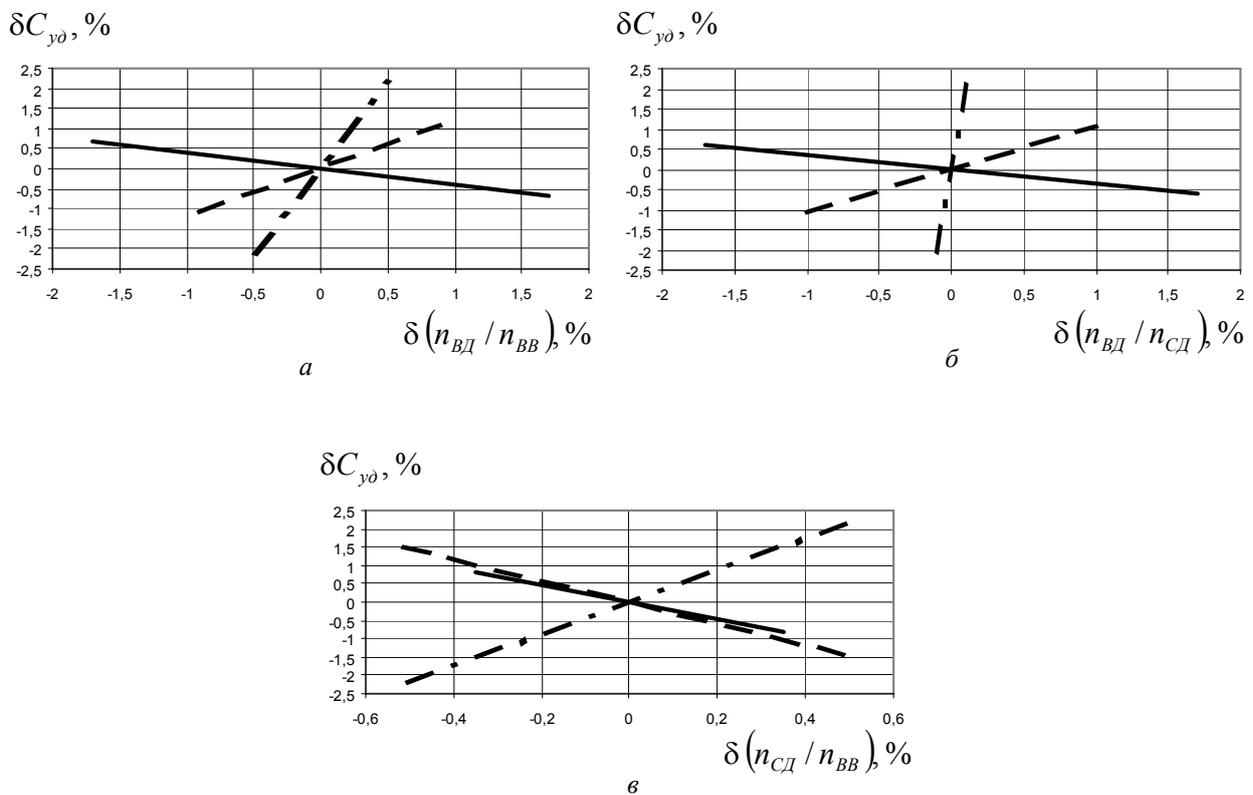


Рис. 3 Корреляционные зависимости отклонения от номинального значения  $C_{y\partial}$  по скольжениям частот вращения роторов при  $P = const$ , соответствующие отклонению от номинальных значений КПД узлов газогенератора (—), турбокомпрессора СД (- - -) и турбовентилятора (-·-·-)

ся. Как следствие, двигатели с пониженными КПД узлов СД на корреляционных зависимостях параметров  $T_i^*$ ,  $p_i^*$ ,  $G_T$ ,  $C_{y0}$ ,  $m$  от  $n_{CD} / n_{BB}$  «лежат» на штриховой линии в верхнем левом квадранте, а от  $n_{ВД} / n_{CD}$  и  $n_{ВД} / n_{BB}$  – в правом верхнем квадранте.

Отметим, что величина скольжения весьма существенно зависит от геометрии проточной части двигателя и, в первую очередь, от площадей минимальных сечений сопловых аппаратов турбин. В вышеизложенном анализе имеются в виду величины скольжения частот вращения роторов, соответствующие одной (номинальной) геометрии проточной части двигателя.

Таким образом, отрицательные отклонения КПД узлов ВД, НД и СД от их номинальных значений формируют три группы двигателей с положительными отклонениями от номинальных значений большинства наиболее значимых замеренных (приведенных к САУ) параметров при  $P_{np} = const$ . Положительные отклонения КПД узлов ВД, НД и СД от их номинальных значений соответственно формируют три группы двигателей с отрицательными отклонениями от номинальных значений большинства наиболее значимых замеренных (приведенных к САУ) параметров при  $P_{np} = const$ . Эти отклонения, построенные по скольжению частот вращения роторов, образуют 9 групп корреляционных зависимостей (рис. 3).

Рассмотренные закономерности изменения параметров в зависимости от скольжения частот вращения роторов целесообразно использовать при предварительном анализе результатов испытаний и формировании исходных данных для идентификации математической модели испытуемого двигателя. Если отклонения параметров исследуемого двигателя (рис. 3, а; 3, б и 3, в) «лежат» в левом верхнем (правом нижнем) квадранте, то можно сделать вывод, что это явилось следствием отрицательного (положительного) отклонения КПД турбины или компрессора ВД от их номинальных значений. Если отклонения параметров исследуемого двигателя по скольжениям  $n_{ВД} / n_{BB}$  и  $n_{CD} / n_{BB}$  «ле-

жат» в правом верхнем (левом нижнем) квадранте (рис. 3, а и 3, в), а величина  $n_{ВД} / n_{CD}$  изменяется незначительно (рис. 3, б), то наиболее вероятно, что причиной такого изменения параметров является снижение (повышение) КПД узлов турбины НД или винтовентилятора. Если отклонения параметров двигателя по скольжению  $n_{CD} / n_{BB}$  «лежат» в левом верхнем (правом нижнем) квадранте, а по скольжениям  $n_{ВД} / n_{CD}$  и  $n_{ВД} / n_{BB}$  – в правом верхнем (левом нижнем) квадранте, то можно предположить снижение (повышение) КПД узлов турбины или компрессора СД.

### Краткие выводы:

1. Изменение замеренных и приведенных к САУ параметров серийных двигателей в пределах дорожки разброса, обусловленное отклонениями от номинальных значений КПД узлов, имеет закономерный характер по скольжению частот вращения роторов.

2. Отрицательными и положительными отклонениями КПД узлов ВД, СД и НД от их номинальных значений формируются 6 групп двигателей: три группы с пониженной эффективностью работы узлов и соответственно с увеличенным расходом топлива, повышенной теплонапряженностью узлов горячей части и сниженными запасами устойчивой работы и три группы двигателей с противоположным изменением параметров.

3. Анализ результатов математического моделирования разброса параметров трехвального ТВВД позволил установить 9 групп зависимостей в пределах дорожки разброса: для каждой группы отклонений КПД узлов (ВД, СД и НД) три группы зависимостей соответственно от трех скольжений частот вращения роторов  $n_{ВД} / n_{CD}$ ,  $n_{CD} / n_{BB}$  и  $n_{ВД} / n_{BB}$ .

4. Полученные закономерности необходимо использовать при термогазодинамическом анализе результатов испытаний. Кроме того, использование установленных закономерностей позволит обоснованно подойти к назначению допустимых отклонений основных данных от их номинальных значений и к разработке технологии отладки двигателя в процессе его сдачи в эксплуатацию.

### Список литературы

1. Кулагин В. В., Корж Н. Д., Рознин В. Д. Соотношение оборотов роторов низкого и высокого давлений – фактор, характеризующий основные данные и теплонпряженность двухвального ДТРД. Пермь: ППИ, 1968.

## INVESTIGATING REGULARITIES OF PARAMETER DISPERSION FOR TWO-SHAFT AND THREE-SHAFT ENGINES

© 2004 S. K. Bochkaryov, V. V. Kulagin

Samara State Aerospace University

The lines of parameter dispersion obtained by testing one hundred commercial two-shaft bypass engines are presented. The results of investigating regularities of parameter dispersion for two-shaft bypass engines and prospective three-shaft superhigh bypass ratio turbo propfan engines are given.