

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СТЕНДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Е. В. Шендалева

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В статье рассмотрены вопросы сравнительных испытаний газотурбинных двигателей. Актуальность межлабораторных сравнительных испытаний подтверждается вниманием мирового метрологического сообщества к этой сфере деятельности. Предложено использование методологии межлабораторных сравнительных испытаний не только для простых объектов, характеристики которых являются мерами сличения средств измерения, но и для сложных технических систем, таких как газотурбинный двигатель. Результатом данного подхода является обеспечение прослеживаемости результатов измерений, полученных на испытательных стендах ГТД различных авиационных предприятий, разработка и введение национальных стандартов в практику стендовых испытаний, повышение качества и безопасности авиационной техники.

Ключевые слова: сравнительные испытания, газотурбинный двигатель, испытательный стенд.

Введение

Проблемы управления качеством промышленной продукции различного назначения на всех стадиях её производства и эксплуатации, включая процедуры контроля, измерений, испытаний и диагностики, всегда актуальны. Наряду с технологическими процессами качество продукции может быть обеспечено деятельностью в сферах метрологии и испытаний. Взаимодействие этих сфер деятельности формирует единство измерений, одним из аспектов которого является прослеживаемость результатов измерений.

Качество и достоверность результатов поверочных, калибровочных, измерительных и испытательных лабораторий могут быть обеспечены участием лабораторий в программах проверки квалификации посредством межлабораторных сравнительных испытаний, в ходе которых определяют правильность и прецизионность результатов измерений характеристик одного и того же объекта в каждой лаборатории [1]. При этом все сравниваемые средства измерений могут быть одинакового уровня точности [2].

Широкое внедрение межлабораторных сравнительных испытаний в современную практику проявилось, прежде всего, в области измерения характеристик веществ и материалов. Но методологию сравнительных испытаний можно использовать и для других объектов, например, средств измерения, установленных на местах их эксплуатации [3].

Постановка задачи

Процедуры измерений, выполняемые на одном и том же объекте при идентичных обстоятельствах, не дают, как правило, идентичных результатов. Это объясняется наличием различных факторов, не всегда поддающихся контролю, и неизбежными случайными погрешностями, присущими каждой измерительной процедуре.

Стенд для испытания газотурбинных двигателей (ГТД) является гораздо более сложным измеритель-

ным инструментом, нежели одиночные средства измерения. Хотя для средств измерения, установленных на стендах для испытания ГТД, обязательны процедуры поверки и калибровки, это не решает проблемы прослеживаемости результатов измерений на разных стендах.

Поэтому более правильным будет при сличении характеристик стендового оборудования в качестве меры сличения выбрать сам ГТД, его входные и выходные технические характеристики.

Теория

Испытания, проводимые в процессе разработки, доводки и серийного производства ГТД, можно объединить в группы [4]:

- 1) научно-исследовательский эксперимент, проводимый на стадии подготовки к разработке двигателя;
- 2) испытания отдельных узлов, проводимые в процессе разработки и доводки двигателя;
- 3) доводочные и специальные испытания опытного двигателя;
- 4) сертификационные и государственные испытания двигателя;
- 5) испытания серийных двигателей.

При серийном производстве ГТД проводят стендовые испытания:

- предъявительские;
- приёмосдаточные;
- квалификационные;
- периодические;
- типовые (технологические).

Испытания экспериментальных образцов двигателя и его элементов необходимы для обоснования и опытного подтверждения расчётов проектируемого двигателя.

После изготовления первых экземпляров создаваемого двигателя проводят его газодинамическую и прочностную доводку для обеспечения требуемых параметров в заданных условиях эксплуатации. В ходе этих испытаний определяют реальные характеристики двигателя и его систем, оптимизируют

режимы совместной работы узлов, выясняют причины отклонений от проектных данных. В процессе доводки в конструкцию вносят множество изменений, которые затем проверяют экспериментально.

После проведения доводочных работ, стендовых и лётных испытаний в составе воздушного судна, до начала серийного производства двигателей гражданской авиации, проводят оценку их соответствия требованиям к лётной годности и охране окружающей среды (сертификацию), включающую сертификационные испытания. Двигатели государственной авиации принимают в эксплуатацию на основании положительных результатов государственных стендовых испытаний (ГСИ). Для двигателей двойного назначения могут проводить совмещённые государственные стендовые и сертификационные испытания.

В процессе серийного производства каждый экземпляр ГТД подвергают кратковременным (предъявительским и приёмосдаточным) испытаниям, между которыми производят разборку, осмотр и дефектацию деталей, повторную сборку двигателя. По результатам измерений на предъявительском этапе корректируют настройку агрегатов системы управления и топливопитания, после чего повторяют циклы проверки и отладки агрегатов на режимах их совместной работы с ГТД. В ходе приёмосдаточных испытаний проводят окончательную проверку и регулировку систем ГТД.

Квалификационные испытания проводят для двигателей, прошедших приёмосдаточные испытания, с целью оценки проведённых мероприятий по устранению недостатков, выявленных на этапе ГСИ или в ходе сертификационных испытаний.

Периодические испытания проводят для контроля стабильности производства и технологического процесса. Они являются ресурсными эквивалентно-циклическими испытаниями, обеспечивающими заданное количество циклов запусков, приёмистостей и сбросов, а также заданную наработку на максимальных режимах в соответствии с установленными требованиями к ресурсу двигателя.

Эксплуатация ГТД выявляет его действительные свойства, в том числе отказы и дефекты, что влечёт необходимость в изменении конструкции и технологии изготовления серийного двигателя. Изменения могут быть введены только после экспериментальной проверки на типовых (технологических) испытаниях.

Таким образом, весь жизненный цикл ГТД сопровождается проведением испытаний. С повышением требований к параметрам двигателя и ростом сложности его систем объём испытаний непрерывно растёт.

Лишь немногие величины, интересующие экспериментатора, являются результатами непосредственного измерения в ходе испытаний. Большая часть результатов измерений подлежит расчёту — приведению к заданным или стандартным атмосферным условиям, определению безразмерных параметров, вычислению скорости, расхода и т. п.

Стенды для испытания ГТД представляют собой сложные сооружения, оснащённые комплексом энергетического оборудования, топливопитания, газоздушными коммуникациями, системами управления, контроля, измерений. Особенно сложными являются стенды для испытания двигателя в высотно-скоростных условиях. Проведение испытаний двигателей сопряжено с большими затратами электроэнергии, топлива и других ресурсов, что

требует повышения информативности испытаний, точности и достоверности результатов измерений.

Дублирование средств измерения, установленных на испытательных стендах, последующее сличение результатов измерения параметров на нескольких стендах и выявление стендов с неудовлетворительными результатами не может дать ответа на вопрос, почему значения параметров одного и того же ГТД, испытываемого на разных стендах, существенно отличаются.

Для уменьшения этих отличий стенды для испытаний однотипных двигателей должны иметь сходное, желательно типовое, конструктивное исполнение. Это касается как помещений, в которых расположены испытательные стенды, так и самих испытательных стендов.

Помещение испытательного стенда состоит из всасывающей шахты, центральной части, где устанавливается двигатель, и выхлопной шахты. Наиболее широкое распространение получили четыре вида расположения этих частей: 1) горизонтальное; 2) в виде перевернутой буквы П; 3) с Г-образным выхлопом и 4) с Г-образной всасывающей шахтой. Для выхлопной шахты наилучшим является горизонтальное расположение, так как оно снижает потери давления в газоздушном тракте стенда. Для всасывающей шахты наилучшим является вертикальное расположение, обеспечивающее подачу чистого воздуха к двигателю [5].

Размеры помещения определяют исходя из общего расхода воздуха через бокс и допустимых скоростей движения воздуха и газа. Если размеры бокса малы, то производят тарировку бокса и вводят поправки к величине тяги для каждого из режимов работы двигателя. При отсутствии на стенде оборудования для создания высотно-температурных режимов также производится перерасчет параметров ГТД по высотно-скоростным условиям.

К отличиям, существенно влияющим на выходные параметры ГТД, относят конструкцию воздухозаборника (имитатора), наличие системы подогрева воздуха на входе в двигатель, наличие термобарокамеры или оборудования для имитации высотных условий, специального оборудования, предназначенного для испытания конкретных типов двигателей. Кроме того, существенно влияет и вид проводимых испытаний. Для получения сопоставимых результатов испытаний ГТД испытательные стенды для различных видов испытаний, например, серийных заводских и доводочных, также должны иметь сходное конструктивное исполнение и близкие по размеру параметры помещения, в котором они установлены.

Отдельные детали и узлы испытывают в составе ГТД или в составе присоединенной к двигателю технологической установки. При этом на двигатель испытываемые детали или узлы устанавливают взамен соответствующих штатных узлов и деталей, а на технологическую установку — в предназначенные для них места. Возможно также одновременное испытание деталей и узлов в составе самого ГТД и присоединенной к нему технологической установки.

Выбор регулируемых параметров ГТД производят исходя из необходимости выполнения основной задачи регулирования — поддержание тяги на установленном режиме:

— обеспечение заданной точности поддержания тяги;

— обеспечение необходимого изменения тяги при изменении температуры и давления воздуха на входе в двигатель;

— обеспечение интегрированного управления двигателем и самолётом.

В качестве регулируемого параметра, косвенно отражающего величину тяги двигателя, принимают:

— частоту вращения ротора вентилятора, ротора компрессора низкого давления (КНД) ($n_B, n_{НД}$);

— частоту вращения ротора компрессора высокого давления (КВД) ($n_{ВД}$);

— степень повышения давления воздуха в компрессоре ($\pi_{КС}^* = P_K^* / P_{ВХ}^*$);

— степень повышения давления воздуха в двигателе ($\pi_{ДВ}^* = P_T^* / P_{ВХ}^*$),

где P_K^* — давление воздуха за компрессором;

$P_{ВХ}^*$ — давление воздуха на входе в двигатель;

P_T^* — давление газа за турбиной.

Программы управления на статических режимах обеспечивают заданный режим с учётом температуры и давления воздуха на входе в двигатель. В современных системах автоматического управления (САУ) реализованы следующие программы управления:

$$n_{НД} = f(\alpha_{РУД}, T_{ВХ}^*, P_{ВХ}^*),$$

$$n_{ВД} = f(\alpha_{РУД}, T_{ВХ}^*, P_{ВХ}^*),$$

$$\pi_{КС}^* = f(\alpha_{РУД}),$$

$$\pi_{ДВ}^* = f(\alpha_{РУД}, T_{ВХ}^*, P_{ВХ}^*, M_{П}),$$

где $\alpha_{РУД}$ — угол поворота рычага управления двигателем (РУД);

$T_{ВХ}^*$ — температура торможения воздуха на входе в двигатель;

$M_{П}$ — число Маха полета.

В резервном регуляторе управление режимом работы выполняется по упрощённым программам:

$$n_B = f(\alpha_{РУД}),$$

$$n_{ВД} = f(\alpha_{РУД}),$$

$$G_T = f(\alpha_{РУД}),$$

$$G_T / P_K^* = f(\alpha_{РУД}),$$

где G_T — расход топлива в основной камере сгорания.

Управление расходом топлива в форсажной камере выполняют по программе

$$G_{ТФ} / P_K^* = f(\alpha_{РУД}, T_{ВХ}^*).$$

При этом площадь критического сечения сопла управляют по программе

$$F_C = f(\alpha_{РУД}, \pi_T^*).$$

На выбор программ управления на переходных режимах влияют характеристики, конструктивная схема двигателя, конструктивное исполнение САУ. Различают следующие виды переходных процессов: приёмистость, сброс, частичная приёмистость и сброс, встречная приёмистость (сброс-приёмистость).

Программы управления по внутридвигательным параметрам с учётом параметров воздуха на входе в двигатель обеспечивают наилучшее протекание переходных процессов. Управление расходом топлива выполняют по следующим программам:

$$\dot{n}_{ВД} = f(n_{ВДпр}, P_{ВХ}^*),$$

$$\dot{n}_{НД} = f(n_{ВДпр}, P_{ВХ}^*),$$

$$G_T / P_K^* = f(n_{ВД}),$$

$$G_T / P_K^* = f(n_{НД}),$$

$$G_T / P_K^* = f(n_{ВД}, T_{ВХ}^*, P_{ВХ}^*),$$

где $n_{ВДпр}$ — приведенная частота вращения ротора КВД. Резервные программы управления имеют вид:

$$n_{ВД} = f(\tau),$$

$$G_T = f(\tau),$$

$$G_T = f(\pi_K^*),$$

$$G_T = f(P_K^*),$$

$$G_T = f(\tau, P_K^*),$$

$$G_T = f(P_K^*, P_{ВХ}^*),$$

где τ — время переходного процесса.

Для управления расходом топлива на участке разгона ротора применяют программы управления как по внутридвигательным параметрам ($P_K^*, T_K^*, n_{ВД}$ или их комбинации) с учётом параметров воздуха на входе, так и запуск по независимому параметру — времени. Программы управления по внутридвигательным параметрам имеют вид:

$$G_T / P_K^* = const,$$

$$G_T / P_K^* = f(n_{ВДпр}),$$

$$G_T / P_K^* = f(n_{ВД}, T_K^*),$$

$$G_{Тпр} / P_K^* = f(n_{ВДпр}),$$

$$G_T / P_{ВХ}^* = f(\Delta n_{ВД} / \Delta t) \text{ при } \Delta n_{ВД} / \Delta t = f(n_{ВД}),$$

где T_K^* — температура газа за компрессором;

$G_{Тпр}$ — приведенный расход топлива в основной камере сгорания.

Программа управления расходом топлива по времени имеет вид

$$G_T = f(\tau),$$

$$dG_T / d\tau = const,$$

$$dG_T / d\tau = f(n_{ВД}),$$

$$n_{ВД} = f(\tau).$$

Применение определённой программы обусловлено пусковыми свойствами двигателя, запасами газодинамической устойчивости компрессора на участке запуска, допустимой температурой газа в турбине.

Результаты экспериментов

В ходе испытаний ГТД определяют следующие параметры:

- тяга двигателя;
- частота вращения ротора;
- расход топлива;
- давление топлива;
- давление рабочего тела в камере сгорания;
- расход воздуха;
- виброускорение, виброскорость и виброперемещение деталей, узлов и изделий;
- температура газов перед турбиной и т. п.

Во время испытаний большое внимание уделяют отработке эксплуатационных свойств двигателя (запуск, приёмистость, устойчивость работы компрессора, высотный запуск форсажной камеры и др.). Эти задачи решают при испытаниях полноразмерных двигателей и их агрегатов на стенде в наземных условиях и при имитации высотных, скоростных и климатических условий.

В связи с критическим характером стендовых испытаний и их влиянием на расчётные характеристики самолётов и вертолётов, а также в связи с необходимостью правильного понимания различных влияющих факторов на сличаемых испытательных стендах должен испытываться один и тот же газотурбинный двигатель [6].

Поскольку целью сравнительных испытаний в этом случае будет «испытание» испытательных стендов, а не двигателей, наличие определённого термодинамического цикла не имеет существенного значения. Двигатель необходимо рассматривать как «чёрный ящик» и измерять все параметры испытательных стендов, влияющих на двигатель, и выходные параметры ГТД. Для более чёткого разделения влияния факторов стенда и самого двигателя на повторяемость (сходимость) и воспроизводимость результатов стендовых испытаний необходимо испытывать, по меньшей мере, два ГТД одного типа на каждом из сличаемых стендов [7].

При выборе базы сравнения выходных характеристик ГТД на разных стендах необходимо отда-

вать предпочтение комплексным характеристикам, таким как отношение расхода к частоте вращения, тяги к коэффициенту давления и удельного расхода топлива к тяге, что связано с высокой чувствительностью комплексных параметров по отношению к задаваемым. Поэтому для ГТД оценку точности необходимо проводить по характеристикам тяги, расхода топлива и воздуха.

Исходя из опыта стендовых испытаний [6] было выявлено, что наиболее значительный разброс имеют показания расходомеров. Поэтому наряду с выбранными мерами сличения (ГТД) необходимо использовать дополнительные меры сличения по расходу топлива, например, массовые расходомеры.

Показателями точности измерений при сравнительных испытаниях служат правильность (систематическая погрешность) и прецизионность (случайная погрешность). Прецизионность сравнительных испытаний в нескольких лабораториях оценивают статистическими показателями повторяемости (сходимости) и воспроизводимости [8].

Испытания ГТД проводят в условиях воспроизводимости — то есть условиях, при которых результаты испытаний получают одним и тем же методом, на одном объекте испытаний, но на разных стендах, разными операторами, с использованием различного оборудования.

В ходе эксперимента были получены данные по расходу топлива, частоте вращения ротора компрессора высокого давления и давлению за компрессором, приведённые в табл. 1.

Обсуждение результатов эксперимента

При испытании одного ГТД дисперсия измеряемого параметра [8] на стенде i

$$s_{ij}^2 = \frac{\sum_{k=1}^{n_{ij}} (\bar{y}_{ij} - y_{ijk})^2}{n_{ij} - 1}, \quad (1)$$

Таблица 1. Данные экспериментов
Table 1. Data of experiments

Технические характеристики	$\alpha_{руд}$, угл. гр.	Стенд 1		Стенд 2		Значения параметров по ТУ
		Испытание 1	Испытание 2	Испытание 1	Испытание 2	
Двигатель 1						
Расход топлива G_T , кг/час	60	3474	3468	3469	3461	3470
	89	6276	6271	6283	6279	6280
	107	7774	7772	7784	7782	7780
Давление воздуха за компрессором P_K^* , кг/см ²	60	13,20	13,18	13,11	13,16	13,20
	89	18,60	18,63	18,65	18,69	18,60
	107	21,08	21,13	21,16	21,11	21,10
Частота вращения ротора высокого давления $n_{ВД}$, об./мин.	60	5000	4989	5022	4999	5000
	89	5293	5305	5291	5303	5300
	107	5454	5462	5444	5451	5450
Двигатель 2						
Расход топлива G_T , кг/час	60	3489	3478	3479	3471	
	89	6278	6281	6273	6278	
	107	7788	7779	7780	7789	
Давление воздуха за компрессором P_K^* , кг/см ²	60	13,10	13,17	13,21	13,17	
	89	18,57	18,66	18,55	18,64	
	107	21,18	21,23	21,13	21,17	
Частота вращения ротора высокого давления $n_{ВД}$, об./мин.	60	5012	5004	5017	5009	
	89	5306	5315	5297	5308	
	107	5464	5467	5453	5456	

где k — индекс единичного измерения на j -м уровне i -го стенда;

j — уровень измерения (угол поворота α_{pyd});

n_{ij} — количество измерений на j -м уровне i -го стенда;

\bar{y}_{ij} — среднее значение результатов измерений на j -м уровне i -го стенда

$$\bar{y}_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{ij}} y_{ijk}}{n_{ij}}. \quad (2)$$

Дисперсия повторяемости измеряемого параметра

$$s_{rj}^2 = \frac{\sum_{i=1}^p (n_{ij} - 1) s_{ij}^2}{\sum_{i=1}^p (n_{ij} - 1)}, \quad (3)$$

где p — число стендов.

Межстендовая (межлабораторная) дисперсия измеряемого параметра

$$s_{Lj}^2 = \frac{s_{dj}^2 - s_{rj}^2}{\bar{n}_j}, \quad (4)$$

где s_{dj}^2 — вспомогательная дисперсия

$$s_{dj}^2 = \frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p n_{ij} (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_j)^2; \quad (5)$$

\bar{n}_j — среднее число измерений на j -м уровне всех стендов

$$\bar{n}_j = \frac{1}{p-1} \left[\sum_{i=1}^p n_{ij} - \frac{\sum_{i=1}^p n_{ij}^2}{\sum_{i=1}^p n_{ij}} \right]; \quad (6)$$

\bar{y}_j — среднее значение результатов измерений на j -м уровне всех стендов

$$\bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^p n_{ij} \bar{y}_{ij}}{\sum_{i=1}^p n_{ij}}. \quad (7)$$

Дисперсия воспроизводимости измеряемого параметра

$$s_{Rj}^2 = s_{Lj}^2 + s_{rj}^2. \quad (8)$$

При наличии опорного значения μ_0 измеряемого параметра (технические условия ТУ, паспорт) критическая разность опорного и среднего значения параметра $|\mu_{0j} - \bar{y}_j|$ на каждом из стендов [9]

$$CD_{ij} = \frac{2,8}{\sqrt{2}} \sqrt{s_{Rj}^2 - s_{rj}^2 \left(1 - \frac{1}{n_{ij}}\right)}. \quad (9)$$

Критическая разность опорного и общего среднего значения параметра $|\mu_{0j} - \bar{y}_j|$ для двух стендов

$$CD_j = \frac{2,8}{\sqrt{2p}} \sqrt{s_{Rj}^2 - s_{rj}^2 \left(1 - \frac{1}{p} \sum_{k=1}^{n_{ij}} \frac{1}{n_{ij}}\right)}. \quad (10)$$

Расчеты, выполненные согласно (1) – (10) (табл. 2) показывают, что условия по критической разности $CD_{ij} > |\mu_{0j} - \bar{y}_j|$ и $CD_j > |\mu_{0j} - \bar{y}_j|$ выполнены и в качестве окончательных результатов испытаний двигателя можно использовать средние значения параметров по двум стендам.

Невыполнение условий по критической разности при испытаниях ГТД говорит о значительном влиянии факторов изменчивости, таких как:

- а) оператор;
- б) используемое оборудование и средства измерения;
- в) калибровка средств измерения;
- г) параметры окружающей среды (температура, влажность, загрязнение воздуха);
- д) компоновка различных видов оборудования и их пневматические, гидравлические и электрические линии связи;
- е) интервал времени между измерениями.

Для исследования и устранения этого влияния необходимо использование методов планирования эксперимента и постановки многофакторных экспериментов.

При наличии двух двигателей (табл. 1) можно рассматривать не только точность стендовых систем задания и измерения параметров, но и погрешности, вносимые самими двигателями [7].

Таблица 2. Результаты расчёта для одного ГТД
Table 2. Computational results for one gas turbine engine

Характеристики	α_{pyd}	Стенд	\bar{y}_{ij}	\bar{y}_j	μ_{0j}	s_{ij}^2	s_{rj}^2	s_{Rj}^2	$ \mu_{0j} - \bar{y}_j $	CD_{ij}	$ \mu_{0j} - \bar{y}_j $	CD_j
G _T	60	1	3471	3468	3470	18,00	25,00	36,75	1,0	9,75	2,0	6,89
		2	3465			32,00			5,0	9,75		
	89	1	6274	6277	6280	12,50	10,25	35,81	6,5	10,97	2,8	7,76
		2	6281			8,00			1,0	10,97		
	107	1	7773	7778	7780	2,00	2,00	51,5	7,0	14,07	2,0	9,95
		2	7783			2,00			3,0	14,07		
P _k *	60	1	13,19	13,16	13,20	0,0002	0,0007	0,0021	0,010	0,081	0,037	0,058
		2	13,14			0,0013			0,065	0,081		
	89	1	18,62	18,64	18,60	0,0005	0,0006	0,0020	0,015	0,081	0,043	0,057
		2	18,67			0,0008			0,070	0,081		
	107	1	21,11	21,12	21,10	0,0013	0,0013	0,0014	0,005	0,055	0,020	0,039
		2	21,14			0,0013			0,035	0,055		
n _{вд}	60	1	4995	5003	5000	60,50	162,50	249,88	5,5	25,71	2,5	18,18
		2	5011			264,50			10,5	25,71		
	89	1	5299	5298	5300	72,00	66,25	66,25	1,0	11,40	2,3	8,06
		2	5297			60,50			3,5	11,40		
	107	1	5458	5453	5450	32,00	28,25	76,31	8,0	15,61	2,8	11,04
		2	5448			24,50			2,5	15,61		

Таблица 3. Результаты расчёта для двух ГТ
Table 3. Computational results for two gas turbine engine

Характеристики	αруд	Стенд	ГТД	Испытание		\bar{y}_{ijt}	w_{ijt}	\bar{y}_{ij}	w_{ij}	\bar{y}_j	SS_{rj}	SS_{Hj}	s_{Rj}	s_{Hj}								
				1	2																	
ГТ	60	1	1	3474	3468	3471	6	3477,3	7,5	3473,6	285,0	256,3	5,97	6,80								
			2	3489	3478	3484	11															
		2	1	3469	3461	3465	8	3470,0														
			2	3479	3471	3475	8															
		89	1	1	6276	6271	6274	5							6276,5	1,8	6277,4	75,0	66,3	3,06	3,45	
				2	6278	6281	6280	3														
	2		1	6283	6279	6281	4	6278,3														
			2	6273	6278	6275	5															
	107	1	1	7774	7772	7773	2	7778,3	5,5	7781,0	179,0	112,5	4,72	4,18								
			2	7788	7779	7784	9															
		2	1	7784	7782	7783	2	7783,8														
			2	7780	7789	7785	9															
P _к *	60	1	1	13,20	13,18	13,19	0,02	13,16	0,000	13,16	0,009	0,006	0,034	0,030								
			2	13,10	13,17	13,14	0,07															
		2	1	13,11	13,16	13,14	0,05	13,16														
			2	13,21	13,17	13,19	0,04															
		89	1	1	18,60	18,63	18,62	0,03							18,62	0,017	18,62	0,019	0,006	0,048	0,015	
				2	18,57	18,66	18,62	0,09														
	2		1	18,65	18,69	18,67	0,04	18,63														
			2	18,55	18,64	18,60	0,09															
	107	1	1	21,08	21,13	21,11	0,05	21,16	0,012	21,15	0,009	0,010	0,094	0,045								
			2	21,18	21,23	21,21	0,05															
		2	1	21,16	21,11	21,14	0,05	21,14														
			2	21,13	21,17	21,15	0,04															
	P _{вд}	60	1	1	5000	4989	4995	11							5001,3	10,5	5006,5	778,0	188,5	11,35	0,00	
				2	5012	5004	5008	8														
			2	1	5022	4999	5011	23	5011,8													
				2	5017	5009	5013	8														
			89	1	1	5293	5305	5299	12	5304,8	5,3	5302,1	467,0	168,3	7,64							3,59
					2	5306	5315	5310	9													
2		1		5291	5302	5296	11	5299,5														
		2		5297	5308	5302	11															
107		1	1	5454	5462	5458	8	5461,8	10,8	5456,4						131,0	105,3	7,81	4,26			
			2	5464	5467	5466	3															
		2	1	5444	5451	5447	7	5451,0														
			2	5453	5456	5455	3															

Для этого определяют:

а) среднее значение параметра для каждого двигателя и расхождения между результатами испытаний $k = 1, 2$ двигателей t на j -м уровне i -го стенда

$$\bar{y}_{ijt} = (y_{ijt1} + y_{ijt2}) / 2, \quad (11)$$

$$w_{ijt} = |y_{ijt1} - y_{ijt2}|; \quad (12)$$

б) среднее значение параметра для двух двигателей и расхождения между значениями параметров двигателей на j -м уровне i -го стенда

$$\bar{y}_{ij} = (\bar{y}_{ij1} + \bar{y}_{ij2}) / 2, \quad (13)$$

$$w_{ij} = |\bar{y}_{ij1} - \bar{y}_{ij2}|; \quad (14)$$

в) общее среднее и стандартное отклонение средних значений на уровне j

$$\bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^p \bar{y}_{ij}}{p}, \quad (15)$$

$$s_{y_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_j)^2}{p-1}}; \quad (16)$$

г) сумму квадратов расхождений между результатами измерений w_{ijt}^2 по p стендам и g двигателям

$$SS_{rj} = \sum_{i=1}^p \sum_{t=1}^g w_{ijt}^2; \quad (17)$$

д) сумму квадратов расхождений результатов измерений w_{ij}^2 по p стендам

$$SS_{Hj} = \sum_{i=1}^p w_{ij}^2; \quad (18)$$

е) дисперсии повторяемости и воспроизводимости

$$s_{rj}^2 = \frac{SS_{rj}}{4p}, \quad (19)$$

$$s_{Rj}^2 = s_{y_j}^2 + \frac{SS_{rj} - SS_{Hj}}{4p}; \quad (20)$$

ж) дисперсии, являющиеся мерами расхождения между значениями параметров двигателей

$$s_{Hj}^2 = \frac{SS_{Hj}}{2p} - \frac{SS_{rj}}{8p}. \quad (21)$$

Результаты расчета для двух двигателей (11) – (21) (табл.3) показывают, что стандартное отклонение воспроизводимости изменения расхода G_T сопоставимо с междвигательным стандартным отклонением по расходу. Стандартные отклонения воспроизводимости измерения давления воздуха P_K^* и частоты вращения $n_{вд}$ превышают соответствующие междвигательные стандартные отклонения.

Выводы и заключение

Опыт проведения межлабораторных (межстендовых) сравнительных испытаний, в которых образцами для сравнения выступают один или несколько ГТД, позволяет объективно оценивать как правильность и прецизионность испытательных стендов, так и статистическую однородность значений параметров двигателя. Стандартизация сравнительных испытаний газотурбинных двигателей и использование соответствующих статистических методов обработки результатов измерений различных параметров обеспечит получение обоснованных значений характеристик ГТД и испытательных стендов.

Список источников

1. ГОСТ Р ИСО 5275-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 1. Основные положения и определения. Введ. 2002-11-01. М.: Изд-во стандартов, 2002. 32 с.
2. МИ 1832-88. Государственная система обеспечения единства измерений. Сличения групп средств поверки одинакового уровня точности. Основные правила: метод. указания. Введ. 1989-07-05. М.: Изд-во стандартов, 1989. 14 с.
3. Каханков А. Е., Чигинев А. В. Обработка результатов сличений расходомерных стендов в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002: материалы 29-й Междунар. науч.-практ. конф. «Коммерческий учет энергоносителей». СПб.: НП «Метрология и энергосбережение», 2009. С. 213-230.
4. Марчуков Е. Ю., Онищик И. И., Рutowский В. Б. [и др.]. Испытания и обеспечение надёжности авиационных двигателей и энергетических установок / под общ. ред. И. И. Онищика. М.: МАИ, 2004. 334 с. ISBN 5-7035-1450-9.
5. Горбунов Г. М., Солохин Э. Л. Испытания авиационных воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1967. 256 с.

6. Mitchell I. G. Compability tests in the international turbine engine test facilities // 24th Joint Propulsion Conference. 1988. P. 1-6. DOI:10.2514/6.1988-3020.

7. ГОСТ Р ИСО 5275-5-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 5. Альтернативные методы определения прецизионности стандартного метода измерений. Введ. 2002-11-01. М.: Изд-во стандартов, 2002. 60 с.

8. ГОСТ Р ИСО 5275-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 2. Основной метод повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений. Введ. 2002-11-01. М.: Изд-во стандартов, 2002. 51 с.

9. ГОСТ Р ИСО 5275-6-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 6. Использование значений точности на практике. Введ. 2002-11-01. М.: Изд-во стандартов, 2002. 51 с.

ШЕНДАЛЕВА Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология». Адрес для переписки: shendalevaev@yandex.ru

Для цитирования

Шендалева Е. В. Сравнительные испытания стендового оборудования для испытания газотурбинных двигателей // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2017. Т. 1, № 1. С. 67-74.

Статья поступила в редакцию 28.07.2017 г.

© Е. В. Шендалева

COMPARATIVE TESTS OF BENCH EQUIPMENT FOR TEST OF GAS-TURBINE ENGINES

E. V. Shendaleva

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

In the article questions of comparative tests of gas-turbine engines are considered. The problem consists in appreciable difference in a gas-turbine engine testing results on different testing benches. The method of interlaboratory (interstand) comparative research has been suggested to use for collation of measurers and control tools precision. At the same time this method is capable of defining relative characteristics of gas turbine engines and their degree of similarity to working conditions. Having applied this method it can provide the support of measuring results traceability at testing benches of different enterprises, improvement of quality and safety of the aircraft equipment is result of this approach.

Keywords: comparative tests, gas turbine engine, testing bench, interlaboratory comparative researches.

References

1. GOST R ISO 5275-1-2002. Tochnost' (pravil'nost' i precizionnost') metodov i rezul'tatov izmereniy. Chast' 1. Osnovnye polozheniya i opredeleniya [Accuracy (accuracy and precision) of measurement methods and results. Part 1. General provisions and definitions]. Moscow: Standartinform Publ., 2002. 32 p. (In Russ.).

2. MI 1832-88. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Slicheniya grupp sredstv poverki odinakovogo urovnya tochnosti. Osnovnye pravila: Metodicheskie ukazaniya [State system of ensuring unity of measurements. Checkings of groups of means of checking of identical level of accuracy. Basic rules: Methodical instructions]. Moscow: Standartinform Publ., 1989. 14 p. (In Russ.).

3. Kakhankov A. E., Chiginev A. V. Obrabotka rezul'tatov slicheniy raskhodomernykh stendov v sootvetstvii s GOST R ISO 5725-2-2002 [Processing of the results of comparisons of flow meters in accordance with GOST R ISO 5725-2-2002]. Saint-Petersburg: Metrologiya i energoberezheniye Publ., 2009. P. 213-230. (In Russ.).

4. Marchukov E. Yu., Onishchik I. I., Rutovskiy V. B. [et al.]. Ispytaniya i obespechenie nadezhnosti aviacionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok [Tests and ensuring reliability of aviation engines and power stations]. Moscow: MAI Publ., 2004. 334 p. ISBN 5-7035-1450-9. (In Russ.).

5. Gorbunov G. M., Solokhin E. L. Ispytaniya aviacionnykh vozdušno-reaktivnykh dvigateley [Tests of aviation air-jet engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1967. 256 p. (In Russ.).

6. Mitchell I. G. Compability tests in the international turbine engine test facilities // 24th Joint Propulsion Conference. 1988. P. 1-6. DOI:10.2514/6.1988-3020. (In Engl.).

7. GOST R ISO 5275-5-2002. Tochnost' (pravil'nost' i precizionnost') metodov i rezul'tatov izmereniy. Chast' 5. Al'ternativnye metody opredeleniya precizionnosti standartnogo metoda izmereniy [Accuracy (correctness and precision) of methods and results

of measurements. Part 5. Alternative methods of definition of a precision of a standard method of measurements]. Moscow: Standartinform Publ., 2002. 60 p. (In Russ.).

8. GOST R ISO 5275-2-2002. Tochnost' (pravil'nost' i precizionnost') metodov i rezul'tatov izmereniy. Chast' 2. Osnovnyy metod povtorjaemosti i vosproizvodimosti standartnogo metoda izmereniy [Accuracy (correctness and precision) of methods and results of measurements. Part 2. Main method of repeatability and reproducibility of a standard method of measurements]. Moscow: Standartinform Publ., 2002. 51 p. (In Russ.).

9. GOST R ISO 5275-6-2002. Tochnost' (pravil'nost' i precizionnost') metodov i rezul'tatov izmereniy. Chast' 6. Ispol'zovanie znacheniy tochnosti na praktike. [Accuracy (correctness and precision) of methods and results of measurements. Part 6. Use of values of accuracy in practice]. Moscow: Standartinform Publ., 2002. 51 p. (In Russ.).

SHENDALEVA Elena Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Transport, Oil and Gas Faculty, Standardization and Certification Department.

Address for correspondence: shendalevaev@yandex.ru

For citations

Shendaleva E. V. Comparative tests of the bench equipment for test of gas-turbine engines // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2017. Vol. 1, no. 1. P. 67-74.

Received 28 July 2017.

© E. V. Shendaleva