



Метрологические аспекты модели уравнивания летательного аппарата на динамическом балансировочном стенде

Рассмотрены результаты разработки методики подтверждения характеристик точности низкочастотного вертикального динамического балансировочного стенда, предназначенного для контроля параметров массоинерционной асимметрии летательных аппаратов конической формы.

Ключевые слова: дисбаланс, центр масс, главная центральная ось инерции, массоинерционная асимметрия, контрольно-измерительный стенд, газостатический подшипник, балансировка, эталон, измерения, погрешность измерений.

Обеспечение динамической устойчивости в процессе траекторного движения скоростного летательного аппарата (ЛА), в частности, стабилизированного вращением, требует на заключительном этапе его общей сборки экспериментального определения массоцентровочных и инерционных характеристик (МЦИХ) – массы, координат центра масс, моментов инерции, а также приведения параметров массоинерционной асимметрии к значениям, не превышающим заданные в эксплуатационной документации на аппарат предельно допустимые значения. К параметрам, характеризующим массоинерционную асимметрию и существенно влияющим на лётно-технические характеристики аппарата, относятся величина поперечного смещения центра масс относительно его геометрической оси, являющейся также осью симметрии наружной поверхности, и угол отклонения продольной главной центральной оси инерции (ГЦОИ) от той же оси.

Массу ЛА, как правило, определяют на стандартных весах, а для определения остальных МЦИХ используют специализированные контрольно-измерительные стенды, учитывающие форму корпуса и другие конструктивные особенности контролируемых аппаратов. Для определения координат центра масс используют центровочные стенды, реализующие весовой метод измерений, а для определения моментов инерции – стенды, реализующие метод физического или крутильного маятника. Достигнутая точность лучших образцов центровочных стендов позволяет по результатам измерений поперечных координат центра масс рассчитывать величину смещения его с геометрической оси ЛА с погрешностью от 0,05 до 0,1 мм, а достигнутая точность лучших образ-

цов маятниковых стендов позволяет по результатам измерений моментов инерции аппарата относительно шести осей рассчитывать угол отклонения продольной ГЦОИ от геометрической оси с погрешностью порядка нескольких угловых минут.

Высокая трудоёмкость и низкая производительность обоих типов стендов являются одним из основных факторов, сдерживающих дальнейшее повышение точности определения и обеспечения параметров массоинерционной асимметрии с их использованием в процессе уравнивания ЛА. Ужесточение требований к точности обеспечения параметров, характеризующих массоинерционную асимметрию аппарата, близость номинальных значений этих параметров к нулю делает актуальным использование динамических балансировочных станков (стендов) для их определения. Из литературы по балансировочной технике известно [1], что точность определения и, следовательно, обеспечения параметров массоинерционной асимметрии тел с использованием метода динамической балансировки при совмещении геометрической оси с осью вращения, имеющейся у балансировочного стенда, в 4–5 и более раз выше, чем при использовании метода статической балансировки.

Для балансировки в динамическом режиме длинномерных тел вращения конической формы в РФЯЦ-ВНИИТФ спроектирована и изготовлена автоматизированная система контроля (АСК), построенная на основе специализированного вертикального низкочастотного динамического балансировочного стенда с жёсткими газовыми опорами и средств вычислительной техники, разработана и исследована методика уравнивания тела в одной

плоскости коррекции, расположенной на значительном расстоянии от его центра масс [2–4]. Система позволяет с высокой точностью определять параметры массоинерционной асимметрии и обеспечивает прецизионное уравновешивание высокоскоростных ЛА после их изготовления и сборки.

Стенд (рис. 1) содержит две опоры, выполненные в виде соосных конических газостатических подшипников (ГСП), удерживаемых консольными подвесами, которые закреплены на вертикальной стойке, установленной на мощном фундаменте. Для измерения вибраций опор, пропорциональных действующим в плоскостях коррекции дисбалансам при вращении в опорах контролируемого объекта, в упругом элементе каждого из подвесов установлен пьезоэлектрический датчик силы. Для измерения частоты вращения объекта, а также в качестве отметчика фазы используется оптоволоконный фотодатчик. Пневматические механизмы разгона и торможения конструктивно совмещены соответственно с верхним и нижним ГСП.

Контролируемый ЛА устанавливается вертикально, торцом вверх (что исключает погрешности, связанные с прогибом корпуса аппарата под действием сил тяжести) внутри специального защитного технологического переходника, предварительно загруженного на ГСП, и фиксируется в осевом направлении с помощью шпилек (не показаны), которые равномерно расположены по окружности профилированной крышки (не показана), прикреплённой к верхнему торцу переходника с помощью винтов. Переходник выполнен в виде тонкостенного металлического кожуха, наружная боковая поверхность которого соответствует рабочим поверхностям газостатических подшипников, и имеет форму усечённого конуса. При этом поверхности внутренних опор переходника соответствуют базовым посадочным поверхностям контролируемого аппарата. Применение переходника исключает возможность механического контакта аппарата с балансировочным оборудованием в процессе выполнения измерений, а также задействует вторую, нижнюю плоскость коррекции, реализованную на нижнем торце переходника, что необходимо для настройки измерительной системы стенда

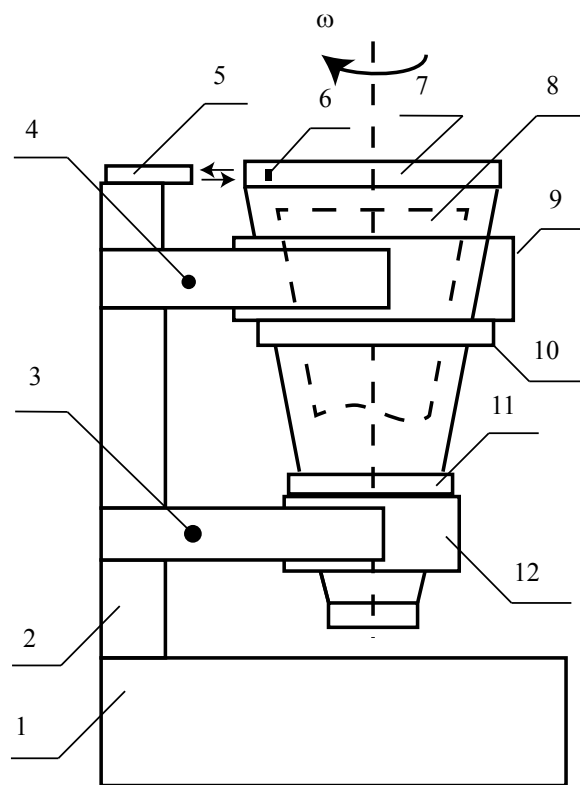


Рис. 1. Конструктивная схема балансировочного стенда:

1 – фундамент; 2 – вертикальная стойка; 3, 4 – датчики силы; 5 – фотодатчик; 6 – зеркальный светоотражатель; 7 – технологический переходник; 8 – объект контроля; 9 – верхний ГСП; 10 – пневматический механизм разгона; 11 – пневматический механизм торможения; 12 – нижний ГСП

на контролируемый ЛА (при этом в качестве верхней плоскости коррекции используется штатная плоскость коррекции, расположенная вблизи торца аппарата). На цилиндрической части наружной боковой поверхности переходника закрепляется зеркальный светоотражатель фотодатчика.

В качестве рабочего тела используется сжатый воздух, поступающий в ГСП и пневматические механизмы разгона и торможения из заводской пневмосети низкого давления (до 0,6 МПа). За счёт жёсткости слоя воздуха, подаваемого под давлением в зазоры между наружными поверхностями вращающегося роторного объекта контроля и рабочими поверхностями ГСП, исключается сухое трение между сопрягаемыми поверхностями и обеспечивается минимальная скорость затухания частоты вращения на выбеге ротора. Раскрутку до рабочей частоты вращения или торможение сборного ротора, образованного переходником и собственно кон-





тролируемым аппаратом, осуществляют, подавая сжатый воздух соответственно в механизм разгона или торможения [2].

Летательный аппарат балансируется на стенде как отдельная деталь в составе сборного ротора. Перед проведением балансировочного эксперимента определяют (на другом оборотовании и с помощью других средств измерений) массу, продольное положение центра масс относительно штатной плоскости коррекции ЛА, а также значения его аксиального и экваториального моментов инерции. После установки ЛА внутри технологического переходника по известным линейным размерам переходника рассчитывают расстояние от центра масс аппарата до нижней плоскости коррекции. Настройку стенда выполняют в ходе балансировочного эксперимента с помощью пробных грузов известной массы, поочередно прикрепляемых к плоскостям коррекции в известных угловых положениях [2, 3]. Искомые значения параметров массоинерционной асимметрии – поперечного смещения центра масс ρ и угла α_x перекоса продольной ГЦОИ относительно геометрической оси ЛА (каждый из которых представляет двухмерную величину, т. е. характеризуется значением и угловым положением) – определяют [1] по результатам измерений векторов дисбалансов аппарата \vec{D}_B и \vec{D}_H , действующих соответственно в верхней и нижней плоскостях коррекции, по формулам:

$$\bar{\rho} = \frac{\vec{D}_B + \vec{D}_H}{M}; \quad (1)$$

$$\bar{\alpha}_x = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2(\vec{D}_B x_B - \vec{D}_H x_H)}{I_3 - I_a}, \quad (2)$$

где x_B и x_H – расстояния от центра масс аппарата до соответственно верхней и нижней плоскостей коррекции;

M – масса;

I_3 и I_a – соответственно экваториальный и аксиальный моменты инерции аппарата, а дисбалансы определяются соотношениями:

$$\vec{D}_B = m_B \vec{r}_B; \quad (3)$$

$$\vec{D}_H = m_H \vec{r}_H, \quad (4)$$

где m_B и m_H – неуравновешенные массы, расположенные на радиусах \vec{r}_B и \vec{r}_H соответственно

в верхней и нижней плоскостях коррекции. При этом определение параметров дисбалансов выполняют с использованием метода двух сборок, когда угловые положения аппарата относительно технологического переходника отличаются между собой на 180° , а результаты измерений дисбалансов сборного ротора, полученные для каждого углового положения ЛА, усредняются с целью исключения паразитных дисбалансов, которые обусловлены использованием технологического переходника в процессе балансировки [3, 4]. Если значение какого-либо из указанных параметров превышает предельно допустимое, то проводят расчёт массы и определяют угловое положение балансировочного груза, прикрепление которого к штатной плоскости коррекции обеспечит приведение их к заданным нормативам.

Зависимости (1)–(4) могут рассматриваться как математическая модель уравнивания летательного аппарата, представляемого как идеальный «длинный» жесткий ротор, и позволяют оценить значения параметров, характеризующих несимметричность в распределении его масс. Очевидно, что точность определения данных параметров аппарата, контролируемого на динамическом балансировочном стенде, при прочих равных условиях зависит от качества функционирования стенда, т. е. в первую очередь определяется метрологическими характеристиками стенда. Основной трудностью при оценке качества функционирования стенда явилось отсутствие эталонов и средств измерений, сопоставимых по точности и диапазонам контролируемых параметров асимметрии масс для оценки погрешностей измерений указанных параметров в процессе уравнивания ЛА на стенде.

Возможно использование одного-двух эталонов, специально изготовленных в виде массогабаритных имитаторов аппарата, каждый из которых обладает единственным набором известных (паспортных) значений контролируемых параметров. Такой подход, применяемый, например, для контроля метрологических характеристик центровочных и маятниковых стендов [5], не позволяет определить характеристики точности балансиро-

вочного стенда во всём диапазоне измерений каждого из контролируемых параметров. А изготовление набора эталонов требуемой формы и с требуемыми массогабаритными, массоцентровочными и инерционными характеристиками, позволяющих исследовать характеристики точности стенда в заданных диапазонах с последующей паспортизацией каждого эталона из этого набора, является технически сложной и дорогостоящей задачей.

Задача контроля погрешностей измерений параметров Π массоинерционной асимметрии решается с использованием эталонного ротора, представляющего собой массогабаритный макет ЛА и выполненного в форме усечённого конуса, на торцах которого имеются приспособления для прикрепления контрольных грузов, а также набора калиброванных контрольных грузов. При этом массо-центровочные и инерционные характеристики, в т. ч. параметры асимметрии масс $\bar{\Pi}_{\text{РОТ}}$ эталонного ротора должны быть известны с высокой точностью, а его габаритные размеры, масса и базовые посадочные поверхности должны соответствовать указанным характеристикам и поверхностям подвергающегося балансировке аппарата. Эталонный ротор для проведения метрологических испытаний устанавливается на внутренние опоры технологического переходника вертикально, большим торцом вверх. Определение параметров массо-инерционной асимметрии, моделируемых с использованием эталонного ротора, выполняют методом двух сборок [3].

Перед проведением испытаний каждый из контролируемых диапазонов измерений параметров $D_{\Pi}=(\Pi_{\min}, \Pi_{\max})$ равномерно разбивают на 4–5 интервалов. Далее в каждой проверяемой точке соответствующего диапазона моделируют (задают в статических условиях) двухмерное эталонное значение параметра асимметрии масс $\bar{\Pi}_{\text{Э}}$ путём прикрепления к плоскостям коррекции в известном угловом положении эталонного ротора контрольных грузов известной массы, и в соответствии с рассмотренной моделью уравнивания ЛА выполняют несколько (до пяти) измерений параметра с использованием метода двух сборок

[4]. Затем, учитывая, что результат измерения $\bar{\Pi}_{\text{ИЗМ}}$ содержит в себе геометрическую сумму смоделированного и присущего эталонному ротору параметров асимметрии, рассчитывают погрешность каждого i -го измерения как модуль геометрической разности между измеренным и эталонным параметром, а также параметром, характеризующим асимметричность в распределении масс эталонного ротора, по формуле:

$$\Delta\Pi_i = |\bar{\Pi}_{\text{ИЗМ}i} - \bar{\Pi}_{\text{Э}} - \bar{\Pi}_{\text{РОТ}}|.$$

Расчёт эталонных параметров для моделирования (поперечного смещения центра масс $\bar{\rho}_{\text{Э}}$ и угла $\bar{\alpha}_{\text{ХЭ}}$ перекоса продольной ГЦОИ относительно геометрической оси эталонного ротора) производится с использованием расположенных на торцах контрольных грузов, которые устанавливаются в известных угловых положениях на верхней и нижней плоскостях коррекции эталонного ротора (рис. 2), по формулам:

$$\bar{\rho}_{\text{Э}} = \frac{mk_{\text{В}}\vec{r}_{\text{ВЭ}} + mk_{\text{Н}}\vec{r}_{\text{НЭ}}}{M_{\text{РОТ}} + mk_{\text{В}} + mk_{\text{Н}}};$$

$$\bar{\alpha}_{\text{ХЭ}} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2(mk_{\text{В}}\vec{r}_{\text{ВЭ}}x_{\text{ВЭ}} - mk_{\text{Н}}\vec{r}_{\text{НЭ}}x_{\text{НЭ}})}{I_{\text{а РОТ}} - I_{\text{э РОТ}}};$$

где $mk_{\text{В}}$ и $mk_{\text{Н}}$ – массы контрольных грузов;
 $M_{\text{РОТ}}$ – масса эталонного ротора;
 $r_{\text{ВЭ}}$ и $r_{\text{НЭ}}$ – радиусы верхней и нижней плоскости коррекции эталонного ротора;
 $x_{\text{ВЭ}}$ и $x_{\text{НЭ}}$ – расстояния от центра масс эталонного ротора до его верхнего и нижнего торцов соответственно, реализующих соответствующие плоскости коррекции;
 $I_{\text{а РОТ}}$ и $I_{\text{э РОТ}}$ – соответственно аксиальный и экваториальный моменты инерции эталонного ротора.

По результатам испытаний стенд и созданная на его базе система контроля признаются годными к эксплуатации, если во всех проверяемых точках отклонения между эталонным значением и результатом измерений для каждого контролируемого параметра асимметрии массы не выходят из допускаемых границ $\Pi_{\text{ДОП}}$, которые определяются в процессе первичной метрологической аттестации. В противном случае система признаётся несоот-



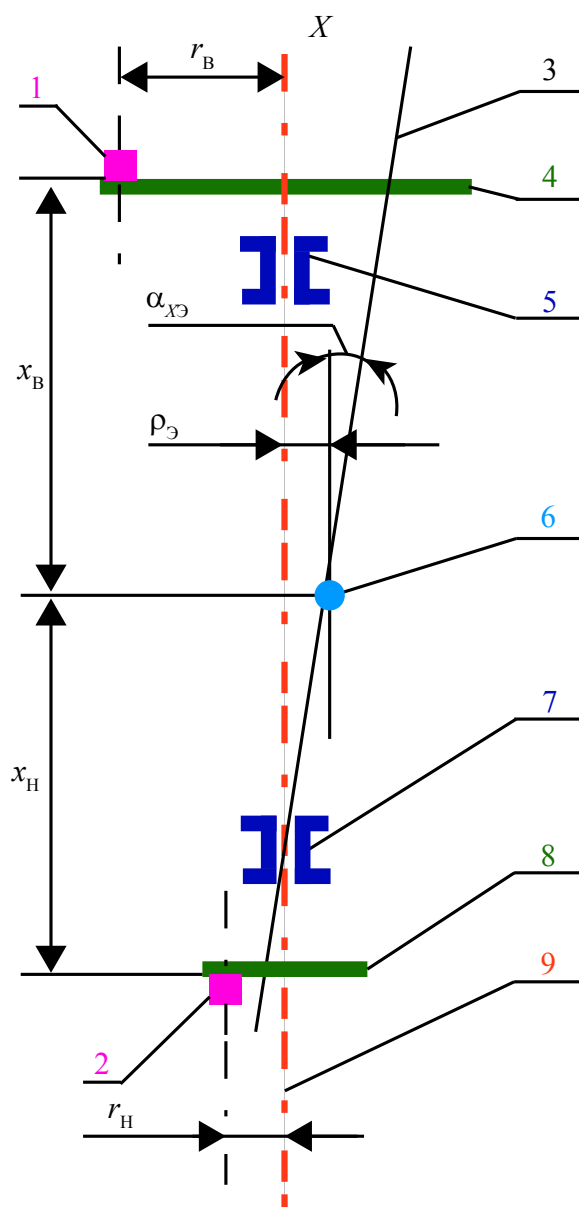


Рис. 2. Схема эталонного ротора:

- 1 – контрольный груз mk_B ; 2 – контрольный груз mk_H ;
3 – продольная ГЦОИ; 4, 8 – плоскость коррекции;
5 – опора верхняя; 6 – центр масс; 7 – опора нижняя;
9 – геометрическая ось

ветствующей заданным требованиям и должна быть направлен в ремонт.

Вывод

Рассмотренный способ и методика обеспечивают возможность проведения периодического контроля метрологических характеристик АСК в заданных диапазонах измерений параметров массоинерционной асимметрии с помощью единственного эталонного ротора. Методика характеризуется высокой информативностью, наглядностью и простотой реализации, что очень важно, например, на этапе серийного

производства продукции. В ходе метрологических испытаний системы исключается влияние параметров собственной асимметрии массы эталонного ротора на результаты определения погрешностей измерений контролируемых параметров. Экспериментально определённые (с использованием эталонного ротора) на рабочей частоте вращения 2 Гц погрешности АСК составили 0,01 мм при определении поперечного смещения центра масс в диапазоне измерений от 0,03 до 0,2 мм и 1 угловую минуту при определении угла перекоса продольной ГЦОИ в диапазоне измерений от 1 до 10 угловых минут.

Способ защищён патентом Российской Федерации на изобретение [6].

Список литературы

1. Основы балансировочной техники. Т. 1. Уравновешивание жёстких роторов и механизмов / под ред. В. А. Щепетильникова. М.: Машиностроение, 1975. 527 с.
2. Балансировочный стенд с вертикальной осью вращения: пат. на изобретение № 2292533 Рос. Федерация, МПК G01M 1/02; Заявлено 12.03.2006; Оpubл. 27.06.2007, Бюл. № 16. 12 с.
3. Ключников А. В., Сидоров А. В. Применение метода динамической балансировки для прецизионного контроля параметров массоинерционной асимметрии роторных объектов // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. 2011. № 3. С. 48–53.
4. Способ балансировки ротора: пат. на изобретение № 2292534 Рос. Федерация, МПК G01M 1/04; Заявлено 12.03.2006; Оpubл. 27.06.2007, Бюл. № 16. 12 с.
5. Матвеев Е. В., Видаков В. С., Корастелёв Ф. А. Совершенствование технологии проверки метрологических характеристик стендов для контроля геометрии масс космических аппаратов // Новые технологии: материалы IX Всероссийской конф. В 3-х т. М.: РАН, 2012. Т. 1. С. 73–83.
6. Способ проверки качества функционирования низкочастотного динамического балансировочного стенда: пат. на изобретение № 2434212 Рос. Федерация, МПК G01M 1/04/ Заявлено 11.07.2010; Оpubл. 18.05.2011, Бюл. № 9. 19 с.

Поступила 29.09.14

Ключников Александр Васильевич – кандидат технических наук, начальник конструкторского отдела ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск.

Область научных интересов: системы контроля и испытаний вооружений и военной техники.

Лысых Александр Валерьевич – инженер-программист 3 категории ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск.

Область научных интересов: автоматизация научных исследований и технологических процессов, программирование.

Чертков Максим Сергеевич – аспирант, инженер-конструктор 1 категории ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск.

Область научных интересов: управление в технических системах, контроль и испытания летательных аппаратов и их систем.

