

### Библиографические ссылки

1. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии / А. И. Скобло, Ю. К. Молоканов, А. И. Владимиров, В. А. Щелкунов. М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. 677 с.
2. Варшавский Г. А. Горение капли жидкого топлива (диффузионная теория) // Бюро новой техники НКАП. М. : Гостехиздат, 1945. № 6. С. 87–106.
3. Демиденко Н. Д. Моделирование статических и динамических режимов в трубчатых печах // Вестник Томского государственного университета. Управление вычислительная техника и информатика. 2012. № 3 (20). С. 13–21.
4. Демиденко Н. Д., Кулагин В. А., Шокин Ю. И. Моделирование и вычислительные технологии рас-

пределенных систем. Новосибирск : Наука. 2012. 424 с.

### References

1. Skoblo A. I., Molokanov Y. K., Vladimirov A. I., Shchelkunov V. A. *Processes and devices of oil and gas refining and petrochemistry*. Moscow, ООО “Nedra-Biznesstsentr”, 2000, 677 p.
2. Warsaw G. A. *Byuro novoy tekhniki NKAP*. Moscow, Gostekhizdat, 1945, no. 6, p. 87–106.
3. Demidenko N. D. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 3 (20), p. 13–21.
4. Demidenko N. D. *Modelirovaniye i vychislitel'nyye tekhnologii raspredelennykh sistem* (Modeling and computing technologies of distributed systems). Novosibirsk, Nauka, 2012, 424 p.

© Демиденко Н. Д., Альсов М. И., 2013

УДК 681.828

### ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ЛЕТАЮЩИХ МОДЕЛЕЙ

В. В. Ильиных, А. В. Ключников, А. В. Лысых, Е. Ф. Михайлов, А. Г. Тимощенко

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт  
технической физики имени академика Е. И. Забабахина  
Россия, Снежинск, ул. Васильева, 13, а. я. 245. E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru

*Обсужден вопрос о повышении точности контроля параметров массо-инерционной асимметрии высокоскоростных осесимметричных летательных объектов с использованием балансировочного оборудования. Представлены конструкция и принцип действия балансировочного стенда с газовыми опорами, структурная схема измерительной системы. Эффективность предложенной технологии балансировки опробована и осуществлена с положительными результатами на вновь спроектированном динамическом балансировочном стенде. Результаты могут быть полезны исследователям при проектировании подобных измерительных систем на основе средств балансировочной техники и их практическом применении.*

*Ключевые слова: летающая модель, центр масс, ось инерции, балансировочный стенд, измерительная система, ротор.*

### TECHNOLOGICAL SUPPORT OF QUALITY DURING THE MANUFACTURE OF HYPERSONIC UNCONTROLLABLE FLYING MODELS

V. V. Ilinykh, A. V. Klyuchnikov, E. F. Mihailov, A. G. Timoshchenko

Russian Federal Nuclear Centre – All-Russia Research Institute of Technical Physics  
named after academician E. I. Zababakhin  
P. b. 245, 13 Vassilyeva str., Snezhinsk, 456770, Russia. E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru

*The article considers the question of increase of precision testing of high speed axisymmetric flying objects mass-inertia parameters with the use of counterbalancing equipment. The construction and operating principle of the balancing stand with the gas bearings and a block diagram of measuring system are presented. The effectiveness of the proposed balancing technology is tested and carried out with the newly designed dynamic balancing stand. The results may be useful for research workers in the process of design of the similar measuring systems based on the means of balancing equipment and in the process of their practical employment.*

*Keywords: flying model, mass centre, axis of inertia, balancing stand, measuring system, rotor.*

В работах [1; 2] отмечается, что снижение динамической устойчивости неуправляемой высокоскоростной летающей модели (ЛМ), представляющей собой тело вращения, например, возникающее под действи-

ем массо-инерционной асимметрии, может привести к появлению различных аномалий при движении модели в атмосфере. В частности, возрастают уровни вибрации, а также могут быть реализованы такие анома-

лии как, значительное (в десятки и сотни раз) увеличение угла атаки по сравнению со статическими балансировочными значениями, останов вращения в плоскости угла атаки и ориентация на набегающий поток воздуха одной стороной (так называемое «лунное» движение модели), обнуление и последующей реверс угловой скорости крена и др. Реализация аномальных режимов полета приводит к существенным отклонениям модели от расчетной траектории и снижению скорости движения таких моделей по сравнению с расчетной, к значительному повышению уровня боковых перегрузок, неравномерному нагреву поверхности, к сбоям и отказам в работе бортовых приборов и систем, появлению дополнительной погрешности в работе датчиковой аппаратуры. Таким образом, одним из условий обеспечения высокой эффективности ЛМ, в частности, стабилизируемой вращением вокруг своей геометрической оси (определяемой как ось симметрии наружной поверхности и обычно принимаемой в качестве строительной), ее движения с заданной точностью по расчетной траектории и надежного функционирования приборов и систем становится обеспечение ее качественной статической и моментной сбалансированности на завершающем этапе общей сборки. Это, в свою очередь, обеспечивает если не полное устранение массо-инерционной асимметрии, то, по крайней мере, ее уменьшение до допустимой величины по критерию влияния последствий возможной динамической неустойчивости на летно-технические характеристики модели. А по наличию и значениям остаточных (после проведения процедуры балансировки) параметров массо-инерционной асимметрии, т. е. параметров, характеризующих асимметричность в распределении масс относительно геометрической оси, можно судить о качестве изготовления ЛМ.

К числу указанных параметров массо-инерционной асимметрии, оказывающих существенное (в ряде случаев – вплоть до катастрофического) влияние на летно-технические характеристики ЛМ, относится величина поперечного смещения центра масс с геометрической оси и углы перекоса осей главного эллипсоида инерции относительно связанной системы координат, в частности, – угол перекоса продольной главной центральной оси инерции (ГЦОИ) относительно геометрической оси [1]. Появление массо-инерционной асимметрии обусловлено неизбежными случайными отклонениями характеристик элементов конструкции (масса, моменты инерции, координаты установки). Это, учитывая невысокую точность теоретического расчета указанных параметров [1–3], который, как правило, проводится на этапе проектирования, делает актуальной задачу их определения и последующего приведения к значениям, не превышающим заданных предельно-допустимых значений, путем корректировки массы ЛМ после изготовления и сборки модели. Главным образом это касается единичного производства уникальных ЛМ, прогнозирование инерционных характеристик которых расчетным путем может иметь погрешности, значительно превышающие заданные допуски. Наиболее досто-

верным способом определения указанных параметров массо-инерционной асимметрии является их измерение. Измерение параметров выполняют с использованием косвенных методов измерений, по специальным методикам, по результатам определения массо-центровочных и инерционных характеристик (МЦИХ) – массы, координат центра масс, моментов инерции ЛМ, – для чего применяют специализированное контрольно-измерительное оборудование, учитывающее характерные конструктивные особенности (форма корпуса, отсутствие удобных базовых поверхностей для установки в измерительное устройство и т. п.) контролируемых объектов. И только для определения массы ЛМ обычно используют стандартные, например, платформенные весы, обладающие требуемой точностью измерений. Необходимую корректировку массы модели, как правило, выполняют с помощью балансировочных грузов, прикрепляемых к штатной плоскости коррекции дисбалансов модели.

В настоящее время для измерения координат центра масс в основном используются так называемые центровочные контрольно-измерительные стенды, реализующие весовой метод измерений. Для измерения моментов инерции широко применяются методы физического маятника, унифиляра, бифиляра, полифиляра, машины Атвуда [3; 4]. Наибольшее применение для этих целей получили контрольно-измерительные стенды, реализующие метод перевернутого унифилярного маятника, обеспечивающие удобный доступ и контролируемому объекту, закрепляемому в технологической оснастке на измерительном столе стенда. Однако стендовое оборудование обоих типов, используемое для проведения контрольных операций, характеризуется сравнительно низкой точностью определения параметров массо-инерционной асимметрии. Однако точность лучших образцов такого оборудования не превышает 0,05–0,1 мм при определении координат центра масс и 4–6 угловых минут при определении угла перекоса продольной ГЦОИ (следовательно, допуск на координату центра масс и на угол перекоса продольной ГЦОИ относительно геометрической оси объекта, для контроля которых могут быть использованы такие стенды, должны быть около 0,5 мм и 40 угловых минут соответственно. В то же время с развитием техники наблюдается увеличение требований к точности изготовления и балансировки высокоскоростных ЛМ. Сегодня требования к обеспечению указанных параметров моделей в несколько раз жестче, что также приводит к соответствующему возрастанию требований к инструментальной точности оборудования, используемого для определения параметров – до значений 0,01 мм и 1 угловой минуты при определении поперечных смещений центра масс и перекосов продольной ГЦОИ соответственно. Симметричность формы, как правило, придаваемой ЛМ при проектировании, конструировании и изготовлении для обеспечения совпадения оси массовой симметрии и геометрической оси, обуславливает близость к нулю номинальных значений контролируемых параметров массо-инерционной асимметрии модели. В свою оче-

редь это обстоятельство определяет специфику и трудности процесса их измерений по сравнению с контролем всех других МЦИХ, в частности, требует для повышения точности, например, известным методом многократных измерений, увеличения числа измерений с последующим усреднением искомых параметров. Однако низкая производительность и высокая трудоемкость обоих типов перечисленного контрольно-измерительного оборудования и необходимость многократной переустановки объекта контроля на стендах (нередко работы по балансировке лишь одной МЛ на них могут продолжаться до нескольких суток), сложность обеспечения неизменных условий в течение всего балансировочного эксперимента препятствует повышению точности измерений.

Применение методов динамической балансировки, позволяющей с высокой точностью совместить геометрическую ось контролируемого объекта с осью вращения, имеющейся на балансировочном станке (стенде), позволяет измерить характеристики асимметрии масс непосредственно относительно этой оси с точностью, в 5–10 раз превышающей точность измерений тех же характеристик на устройствах, реализующих методы статической балансировки [3]. При этом проведение работ по балансировке сложных тел вращения (к числу которых вполне можно отнести ЛМ), когда деформации от вращения вносят существенные погрешности, или если внутренние элементы конструкции могут сместиться при вращении с высокими скоростями, а на корпусе отсутствуют удобные базовые поверхности для установки на стандартные опоры балансировочного станка, требует применения специфической технологической оснастки и низких (зачастую не превышающих 1–2 Гц) рабочих частот вращения, что не позволяет применять серийно выпускаемые станки, диапазоны рабочих частот которых, как правило, начинаются от 6–10 Гц, а также требует вертикального расположения оси вращения, исключающего прогибы модуля под действием силы тяжести.

Для прецизионного определения параметров массо-инерционной асимметрии скоростных конических ЛМ методом низкочастотной балансировки спроектирована и изготовлена автоматизированная система контроля, построенная на базе вертикального дорезонансного динамического балансировочного стенда с жесткими газовыми опорами, выполненными в виде соосных конических газостатических подшипников, и средств вычислительной техники.

Конструктивная схема балансировочного стенда приведена на рис. 1. Стенд содержит две – верхнюю и нижнюю – консольно закрепленные на вертикальной стойке идентичные по конструкции колебательные подвески, каждая из которых выполнена в виде пары упругих плоскопараллельных пластин с общим массивным основанием, удерживающих соответственно верхний или нижний газостатические подшипники. С верхним подшипником совмещен пневматический механизм раскрутки, а с нижним – пневматический механизм торможения в опорах объекта. Вертикальная стойка закреплена на мощном фундаменте.

В упругих элементах опор, с поджатием, выполняемым с помощью винтов, размещаются пьезоэлектрические датчики силы генераторного типа.

Стенд снабжен жестким максимальным сбалансированным технологическим переходником, имеющим форму усеченного конуса и выполненным в виде тонкостенного металлического кожуха, наружная боковая поверхность которого соответствует рабочим поверхностям газостатических подшипников. При этом поверхности внутренних опор переходника соответствуют базовым посадочным поверхностям контролируемой ЛМ. На внутренние опоры переходника ЛМ устанавливается торцом вверх в соответствии с рис. 2 и фиксируется с использованием трех фиксирующих шпилек (не показаны), равномерно расположенных по окружности на крышке (не показана), образуя тем самым так называемый сборный ротор.

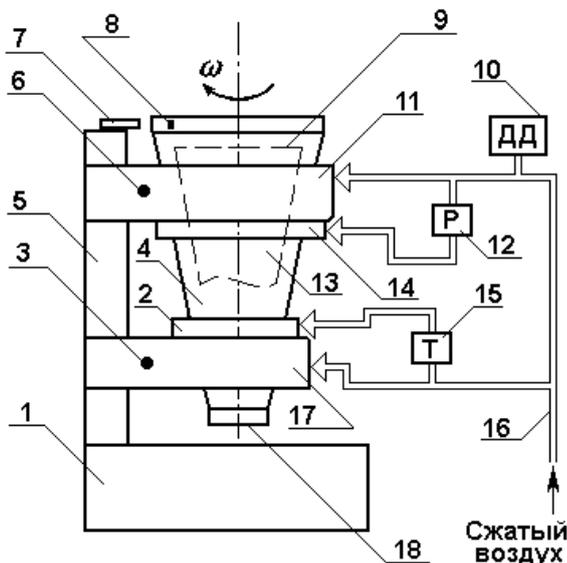


Рис. 1. Схема вертикального балансировочного стенда: 1 – фундамент; 2 – пневматический механизм торможения; 3 – нижний датчик силы; 4 – технологический переходник; 5 – вертикальная стойка; 6 – верхний датчик силы; 7 – световодный жгут фотодатчика; 8 – светоотражающее зеркало; 9 – верхняя (первая) плоскость коррекции; 10 – верхняя колебательная подвеска; 11, 17 – напорные трубопроводы пневмораспределительной системы; 12 – электропневмораспределитель «Разгон»; 13 – объект контроля; 14 – пневматический механизм разгона; 15 – электропневмораспределитель «Тормоз»; 16 – нижняя колебательная подвеска; 17 – нижняя (вторая) плоскость коррекции; 18 – сжатый воздух

Применение переходника, исключает возможность механического контакта контролируемой модели с балансировочным оборудованием в процессе выполнения измерений, а также материализует вторую (нижнюю) плоскость коррекции, что необходимо для настройки измерительной системы стенда. При этом в процессе настройки системы в качестве первой (верхней) плоскости коррекции используется штатная плоскость коррекции ЛМ.

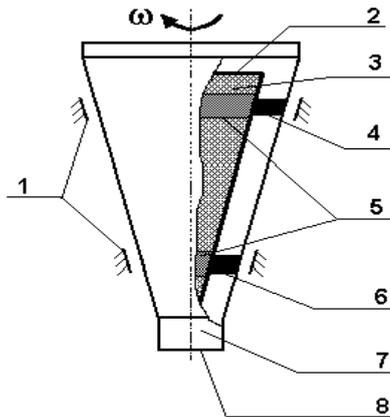


Рис. 2. Схема размещения ЛМ внутри технологического переходника в составе сборного ротора:

1 – газостатические подшипники; 2 – верхняя (штатная) плоскость коррекции; 3 – объект контроля; 4 – верхняя внутренняя опора; 5 – базовые поверхности ЛМ; 6 – нижняя внутренняя опора; 7 – технологический переходник; 8 – нижняя плоскость коррекции

В качестве рабочего тела используется сжатый воздух, поступающий из заводской пневмосети под давлением не менее 0,6 МПа. В ходе балансировочного эксперимента сжатый воздух посредством трубопроводов пневмораспределительной сети (ПРС) через кольцевые щелевые питатели, имеющиеся в каждом газостатическом подшипнике, поступает (непрерывно) в зазор между сопрягаемыми поверхностями обоих подшипников и технологического переходника, а также (через посредство электропневмораспределителей) подается в пневматические механизмы разгона и торможения, обеспечивая раскрутку и останов сборного ротора.

Для подготовки сжатого воздуха каждый из четырех воздуховодных каналов ПРС оснащена устройством, обеспечивающим очистку сжатого воздуха, поступающего в газостатические подшипники и пневматические механизмы балансировочного стенда, как от твердых и субмикронных твердых частиц, так и от масла, а также обеспечивает удаление конденсата. В результате поддува воздуха сборный ротор, загруженный на стенд, занимает центральное положение, совмещая ось симметрии наружной поверхности технологического переходника с осью вращения. В ходе балансировочного эксперимента совмещение геометрической оси контролируемой ЛМ с осью вращения обеспечивается методически, по результатам измерений дисбалансов сборного ротора для двух диамет-

рально противоположных фиксированных положений модели внутри технологического переходника.

Измерение давления сжатого воздуха, поступающего на вход ПРС, осуществляется с помощью аналогового датчика давления. Датчик также обеспечивает контроль аварийного уровня давления сжатого воздуха.

Оптоволоконный фотодатчик предназначен для контроля частоты вращения сборного ротора. Также фотодатчик используется для определения фазы дисбалансов. При этом светоотражающее зеркало фотодатчика закрепляют на цилиндрической части боковой поверхности технологического переходника и не изменяют в течение всего балансировочного эксперимента. Фотодатчик формирует световой пучок, направляемый по световодному жгуту к переходнику, а также принимает свет, отраженный от светоотражающего зеркала, угловое положение которого однозначно связано с системой координат переходника и контролируемой модели. Фотодатчик срабатывает по окончании каждого полного оборота переходника вокруг своей оси в момент приема отраженного пучка света. Прохождение прямого и отраженного пучков света обеспечивает световодный жгут.

Для проведения работ по тестированию нормируемых метрологических характеристик системы контроля, выполняемых с определенной периодичностью, балансировочный стенд снабжен эталонными телами, представляющими собой габаритно-массовые макеты контролируемых ЛМ. Каждое эталонное тело обладает известными с высокой точностью массоцентровочными и инерционными характеристиками, а базовые посадочные поверхности тела соответствуют аналогичным поверхностям конкретного типа ЛМ.

Для индивидуальной настройки системы на конкретный объект контроля балансировочный стенд оснащен набором калиброванных пробных грузов.

Структурно-функциональная схема измерительной системы стенда приведена на рис. 3. Измерительно-вычислительным и управляющим ядром системы является персональный компьютер (ПК), оснащенный устройствами аналогового и цифрового ввода-вывода, которые выполнены в виде электронных модулей и установлены в свободные слоты шины расширения на материнской плате системного блока ПК. Имеющийся в составе устройства аналогового ввода таймер-счетчик для подсчета меток времени, генерируемых высокостабильным генератором и используется для определения частоты вращения сборного ротора.

Под управлением рабочей программы ПК обеспечивает в режиме реального времени опрос датчиков силы, контролирует частоту вращения ротора и давление сжатого воздуха на входе ПРС, формирует команды на включение и выключение электропневмораспределителей для разгона и торможения ротора, выполняет запуск процесса оцифровки и регистрации в оперативной памяти вибросигналов, поступающих от датчиков силы, при достижении ротором рабочей частоты вращения. Также ПК осуществляет обработку вибросигналов с применением процедуры Фурье-фильтрации, обеспечивая выделение с частотой, рав-

ной рабочей частоте вращения ротора, и определение амплитуд и фаз дискретных составляющих зарегистрированных вибросигналов, пропорциональных соответственно амплитудам и фазам вибраций опор (вызванных дисбалансами вращающегося в опорах ротора), выполняет математические расчеты, обеспечивает визуализацию эксперимента, выдает на печать протокол балансировки.



Рис. 3. Структурная схема измерительной системы

Контроль частоты вращения выполняется с использованием высокостабильного генератора временных меток и таймера-счетчика, имеющегося в составе устройства аналогового ввода. Таймер-счетчик работает в режиме непрерывного счета входных импульсов (меток времени), поступающих с выхода высокостабильного генератора. Фотодатчик непрерывно излучает свет, направленный по световоду к технологическому переходнику, и вырабатывает импульсный сигнал в момент получения отраженного от зеркала ответного пучка света. По сигналу от фотодатчика, вырабатываемому при завершении каждого полного оборота сборного ротора, ПК считывает содержимое таймера-счетчика, по приращению результата счета определяет количество меток времени, поступивших на вход счетчика с момента предыдущего считывания, и рассчитывает текущую частоту вращения сборного ротора.

Двухканальное устройство аналоговой обработки сигналов обеспечивает импедансное согласование выходов датчиков силы, низкочастотную аналоговую фильтрацию и усиление вибросигналов, поступающих для оцифровки на вход устройства аналогового ввода сигналов.

Испытуемая ЛМ балансируется на стенде в качестве отдельной детали, входящей в состав сборного ротора [5]. В процессе балансировочного эксперимента регистрацию всех вибросигналов, поступающих от датчиков силы и несущих в себе информацию о дисбалансах, выполняют на выбеге сборного ротора (после его предварительной раскрутки), при постоянном рабочем давлении сжатого воздуха, на постоянной рабочей частоте вращения. В процессе регистрации вибросигналов изменение частоты вращения не пре-

вышает ~0,5–0,6 % от рабочей частоты вращения. Малая скорость самопроизвольного торможения ротора обеспечивается применением газовой смазки, исключающей сухое трение в опоре.

Перед балансировкой на другом оборудовании и с использованием других средств измерений определяют массу  $M$ , продольное положение центра масс относительно штатной (верхней) и второй (нижней) плоскости коррекции, а также экваториальный  $I_3$  и аксиальный  $I_a$  моменты инерции ЛМ. Полученную информацию используют в качестве начальных данных для проведения последующих расчетов при определении контролируемых параметров массо-инерционной асимметрии модели.

В ходе эксперимента в каждом пуске сборного ротора определяют амплитуды и фазы дискретных составляющих вибросигналов, пропорциональных дисбалансам сборного ротора. Искомые параметры массо-инерционной асимметрии ЛМ определяют расчетным путем по результатам измерения в двух плоскостях коррекции значений и углов дисбалансов сборного ротора. Измерения выполняют сначала для сборного ротора в исходном состоянии, а затем – после установки в известных угловых положениях (последовательно в верхней и нижней плоскостях коррекции) пробных грузов известной массы. Измерения в исходном состоянии сборного ротора проводят дважды – для двух фиксированных угловых положений модели относительно переходника, отличающихся друг от друга на 180 градусов, с последующим исключением действия «паразитных» дисбалансов, обусловленных наличием технологического переходника в сборке, путем вычисления для каждой плоскости коррекции геометрической полуразности двух векторов дисбалансов сборного ротора [5]. Это обеспечивает совмещение оси симметрии наружной поверхности испытуемого модуля с осью симметрии наружной поверхности технологического переходника.

По результатам экспериментов с пробными грузами определяют коэффициенты балансировочной чувствительности системы к дисбалансам в каждой плоскости коррекции, а также коэффициенты взаимного влияния плоскостей коррекции. Полученные коэффициенты затем используют при расчете начальных значений и углов дисбалансов контролируемой ЛМ  $\vec{D}_B$  и  $\vec{D}_H$ , действующих соответственно в верхней и нижней плоскостях коррекции. Далее рассчитывают начальные параметры радиуса-вектора поперечного смещения центра масс и вектора-угла перекоса продольной ГЦОИ модели относительно ее геометрической оси по формулам [3; 4]:

$$\vec{\rho} = \frac{\vec{D}_B + \vec{D}_H}{M};$$

$$\vec{\alpha}_{ГЦОИ} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2 \cdot (\vec{D}_B \cdot x_B - \vec{D}_H \cdot x_H)}{I_3 - I_a},$$

где  $x_B$  и  $x_H$  – расстояния от центра масс модуля до соответственно верхней и нижней плоскости коррекции. Далее (в случае, если какой-либо из указанных

параметров массо-инерционной асимметрии превышает предельно-допустимое значение), рассчитывают массу и угловое положение балансировочного груза (грузов) для прикрепления к штатной плоскости коррекции модели с целью корректировки ее.

Рассмотренная технология балансировки и реализующая ее система, построенная на базе вертикального низкочастотного динамического балансировочного стенда с коническими газостатическими подшипниками, при номинальной частоте вращения 2 Гц обеспечила возможность определения величины поперечного смещения центра масс и угла перекоса продольной ГЦОИ с погрешностями, не превышающими соответственно 0,01 мм в диапазоне измерений от 0,03 до 0,2 мм и 1 угловой минуты в диапазоне измерений от 1 до 10 угловых минут. Высокая точность измерений обеспечивается низкой частотой вращения, когда контролируемая ЛМ еще проявляет свойства жесткого ротора и деформации от вращения в опорах не вносят существенных погрешностей в результаты измерений, вертикальным расположением оси вращения, исключая прогибы корпуса под действием сил тяжести, использованием газовой смазки для разделения сопрягаемых рабочих поверхностей сборного ротора и опор, индивидуальной настройкой балансировочного стенда на контролируемую модель в ходе эксперимента [5]. Применение в системе пьезоэлектрических датчиков силы, не требующих питания, и фотоэлектрического датчика оборотов, а также применение пневматических приводов для раскрутки и торможения ротора обеспечивают взрывобезопасность применения стенда. Применение технологического переходника обеспечивает материализацию второй плоскости коррекции и сохранность внешних поверхностей балансируемых тел.

Результаты опытной эксплуатации подтвердили высокую производительность (время балансировочного эксперимента, как правило, не превышает 1,5–2 часов) и эффективность технологии прецизионного уравновешивания в динамическом режиме тел вращения, обладающих единственной, расположенной на значительном расстоянии от центра масс тела, плоскостью коррекции. Разработка защищена патентами РФ 2292533, 2292534, 2434212, 2453818.

Сложность разработки такой системы делает оправданным ее внедрение для контроля таких уникальных объектов как высокоскоростные ЛМ, предъявляющих после их изготовления и сборки высокие

требования к точности и надежности экспериментального определения параметров массо-инерционной асимметрии, и обеспечивает снижение вероятности появления аномальных режимов полета и, соответственно, повышение эффективности использования высокоскоростных неуправляемых летающих моделей.

#### Библиографические ссылки

1. Правдин В. М., Шанин А. П. Баллистика неуправляемых летательных аппаратов. Снежинск : РФЯЦ-ВНИИТФ, 1999. 496 с.
2. Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н., Богодистов С. С. Внешняя баллистика. М. : Машиностроение, 1991. 640 с.
3. Основы балансировочной техники. Т. 1. Уравновешивание жестких роторов и механизмов / под ред. В. А. Щепетильникова. М. : Машиностроение, 1975. 527 с.
4. Методы исследований на летающих моделях / под ред. А. Д. Миронова. М. : Машиностроение, 1988. 144 с.
5. Ключников А. В. Методика планирования эксперимента по определению величины поперечного смещения центра масс корпусов деталей методом динамической балансировки в условиях влияния значительной паразитной массы // Материалы XXXI Всерос. конф. по проблемам науки и технологий. Миасс, 2011. С. 163–166.

#### References

1. Pravdin V. M., Shanin A. P. *Ballistika neupravlyaemih letatel'nykh apparatov* (Ballistics of uncontrollable flying machines). Snezhinsk, RFNC-VNIITF, 1999. 496 p.
2. Dmitrievskiy A. A., Lisenko L. N., Bogodistov S. S. *Vneshnyaya ballistika* (External ballistics). Moscow, Mashinostroenie, 1991. 640 p.
3. Shchepetil'nikov V. A. *Osnovy balansirovochnoi tekhniki* (Fundamentals of balancing technique). Vol. 1. Moscow, Mashinostroenie, 1975, 527 p.
4. Mironov A. D. *Metody issledovaniy na letayushchih modelyah* (Methods of researches on flying models). Moscow, Mashinostroenie, 1988, 144 p.
5. Klyuchnikov A. V. *Trudy 31 Vserossiyskoy konferentsii po problemam nauki i tekhnologii* (Proc. 31th All-Rus. Conf. for problems of science and technology). Miass, 2011, p. 163–166.