

КОНСТРУКТИВНЫЙ ОБЛИК СТЕНДА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАССОИНЕРЦИОННОЙ АСИММЕТРИИ ДЛИННОМЕРНЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ

А. В. Ключников

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия
a.klyuchnicov@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Одной из задач, решаемых разработчиком и изготовителем сложного ротора, например, представляющего собой длинномерное тело вращения, внутри которого имеются рамы, отсеки, размещена в амортизации аппаратура, является приведение параметров массо-инерционной асимметрии тела к нормативам, заданным в его эксплуатационной документации. *Материалы и методы.* Определение и обеспечение указанных параметров выполняются на завершающем этапе общей сборки ротора с использованием контрольно-измерительных стендов. Применение динамических балансировочных стендов и методов динамической балансировки позволяет значительно повысить точность контроля указанных параметров по сравнению со стендами статической балансировки. В статье приведено описание конструктивно-технологических особенностей и особенностей функционирования вертикального динамического балансировочного стенда с коническими газостатическими подшипниками, предназначенного для прецизионной балансировки длинномерного тела конической формы, имеющего единственную плоскость коррекции. При проведении измерений контролируемое тело размещается внутри специализированной технологической оснастки, обеспечивающей физическую защиту наружной поверхности тела и материализацию второй плоскости коррекции. Алгоритм обработки измерительных сигналов обеспечивает выделение полезных сигналов из аддитивной смеси с мощными помехами промышленного характера. *Результаты и выводы.* Методика балансировки позволяет исключить промежуточные шаги балансировки, сократив число шагов балансировки, как правило, до одного шага, а также сократив время проведения балансировочного эксперимента. За один шаг балансировки методика позволяет при использовании единственной плоскости для коррекции дисбалансов либо привести параметры массоинерционной асимметрии контролируемого тела к заданным нормативам, либо диагностировать невозможность для конкретной конструкции тела обеспечить достижение заданных нормативов. Точность определения параметров массоинерционной асимметрии длинномерного тела с использованием рассмотренного динамического стенда с коническими газостатическими подшипниками более чем в пять раз превысила точность определения тех же параметров на стендах, реализующих весовой и маятниковый методы измерений.

Ключевые слова: сложный ротор, геометрическая ось, масса, центр масс, ось инерции, вибрация, динамическая балансировка, балансировочный стенд, рабочий эталон

Для цитирования: Ключников А. В. Конструктивный облик стенда для прецизионного определения параметров массоинерционной асимметрии длинномерных тел методом динамической балансировки // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 106–117. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-13

DESIGN OF A MEASUREMENT STAND FOR PRECISION DETERMINATION OF THE MASS-INERTIA ASSYMETRY OF LONG ITEMS BY DYNAMIC BALANCING

A.V. Klyuchnikov

Russian Federal Nuclear Centre – All-Russia Research Institute
of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Russia
a.klyuchnicov@bk.ru

Abstract. *Background.* One of the major tasks challenges designer and manufacturer of a composite rotor, which as an example, presents itself a long gyration item with frames, compartments, instruments in it composition, is matching parameters of mass-inertia asymmetry with values, specified in operational documentation for the item. *Materials and methods.* Both characterization and ensuring these mass-inertia asymmetry parameters are made at a fi-

nal assembly stage, with special check-out gauging stands. Using of dynamic balancing stands and dynamic balancing methods allows to a great extent improve an accuracy of measurement of mass-inertia asymmetry parameters compared with stands, which realized static methods of balancing. In the article both design-and-technological features and functioning features of vertical dynamic balancing stand with cone gas bearings, which is intended for high accurate balancing of long item, which equips by only correction plane, are given. When measuring the item under control is placed inside some special technological equipment, providing physical protection of the external surface of the item, and then generating the second correction plane. The algorithm of sensor signals processing, enabling selection of the useful signals from the additive mixture of power industrial noise. *Results and conclusions.* The methods of balancing of the item enables omitting intermediate steps of balancing, reducing them to one step (as a rule), and shortening the balancing time, as well. In one step of balancing the methods permits either bringing parameters of mass-inertia asymmetry of the item to specified standards, or diagnosing impossibility of attaining the specified standards with available design of item, if uses only plane for correction of nonbalances. An accuracy of determination of long item's mass-inertia asymmetry parameters with the use of the offered dynamic balancing stand with cone gas bearings has been overfulfilled more than five times an accuracy of determination of the same parameters with using stands, which realized weight and pendulum methods.

Keywords: rotor structure, geometric axis, mass, center of mass, axis of inertia, vibration, dynamic balancing, balancing stand, working standard

For citation: Klyuchnikov A.V. Design of a measurement stand for precision determination of the mass-inertia assymetry of long items by dynamic balancing. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1): 106–117. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-13

Введение

Обеспечение высокого качества функционирования сложных изделий машиностроения, в частности, конструкция которых представляет собой длинномерное твердое тело вращения (роторный модуль), в состав которого входят, например, рамы, отсеки, измерительная аппаратура, исполнительные механизмы и другое, зачастую требует высокой точности определения величины смещения центра масс ρ с геометрической оси ротора X (совпадающей с осью симметрии наружной поверхности ротора) и угла отклонения продольной главной центральной оси инерции (ГЦОИ) α_x от той же оси. Указанное твердое тело вращения характеризует асимметричность в распределении масс изделия относительно геометрической оси, а также последующего уравнивания тела путем коррекции его массы [1, 2]. К подобным изделиям относятся, например, тонкостенные спутниковые узлы, нежесткие сборки типа разворачивающихся в невесомости антенн, роторы, внутри которых не жестко размещена геофизическая аппаратура или сейсмические датчики. В настоящее время определение указанных параметров массоинерционной асимметрии, представленных соответственно на рис. 1, 2, как правило, выполняют с использованием специализированных контрольно-измерительных стендов.

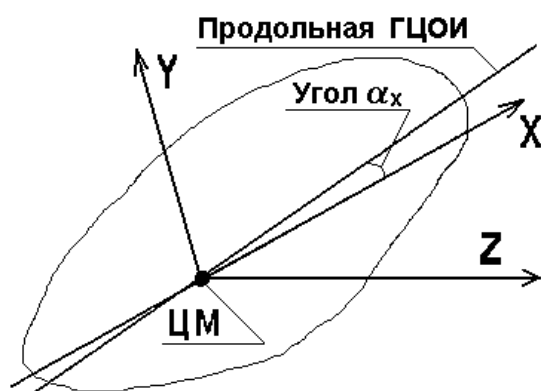


Рис. 1. Перекос продольной ГЦОИ

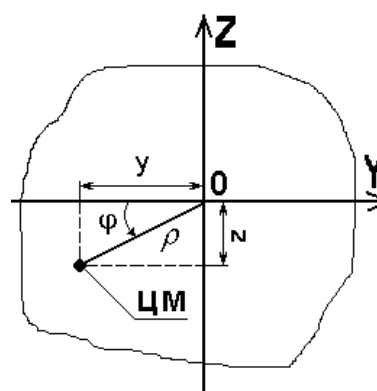


Рис. 2. Смещение центра масс

Близость к нулю номинальных значений параметров массо-инерционной асимметрии определяет трудности процесса измерения этих параметров. Использование контрольно-измерительных стендов, реализующих весовой метод и метод маятника (физического или крутильного), широко применяемых в настоящее время для определения соответственно координат центра масс и моментов инерции с последующим расчетом параметров массоинерционной асимметрии, проводимым по

специальным методикам, не позволяет достигать высоких показателей точности балансировки ввиду низких характеристик инструментальной точности и низкой производительности стендов обоих типов. Как правило, точность определения координат центра масс на весовых стендах не превышает 0,05–0,1 мм, а точность определения угла перекоса продольной ГЦОИ относительно геометрической оси роторного модуля по результатам определения моментов инерции на маятниковых стендах не превышает 5–10 угловых минут [2]. Однако современные требования к точности определения параметров массоинерционной асимметрии кратно жестче и зачастую составляют ~0,01 мм по точности определения величины поперечного смещения центра масс и ~1 угловую минуту по точности определения перекоса продольной ГЦОИ [3]. Поэтому высокая инструментальная точность динамических балансировочных стендов и их высокая производительность делает привлекательным их применение для обеспечения высоких требований к точности измерений указанных параметров массоинерционной асимметрии [2–4].

Как известно из теории балансировки, жесткий ротор можно полностью сбалансировать в двух произвольных плоскостях коррекции на любой частоте вращения, устранив с требуемой точностью как смещение центра масс, так и перекося продольной ГЦОИ относительно геометрической оси. Однако для длинномерных роторов, обладающих единственной плоскостью коррекции, расположенной на значительном расстоянии от центра масс, например, для роторов, выполненных в форме кругового конуса с малым полууглом раствора, возможно устранение лишь одного из двух контролируемых параметров массоинерционной асимметрии. Это обстоятельство не позволяет обеспечить полное статическое и моментное уравнивание и делает возможным для балансировщиков лишь приведение параметров массоинерционной асимметрии к неким значениям, не превышающим задаваемых в эксплуатационной документации для таких роторов предельно-допустимых значений [1, 4, 5]. Дополнительными сложностями могут являться значительные габаритные размеры контролируемого ротора по длине и диаметру, тонкие стенки корпуса, отсутствие собственных опорных поверхностей, удобных для установки на измерительное устройство, наличие нежестких элементов конструкции, выступающих за пределы корпуса и др. К тому же в случаях, когда деформации от вращения с высокими скоростями и прогибы, вызванные действием сил тяжести при горизонтальном положении тела, вносят существенные погрешности или если внутренне элементы могут сместиться по тем же причинам, для проведения процедуры уравнивания требуется применение балансировочного оборудования с вертикальной осью вращения, чтобы устранить действие нагрузок от массы тела, а также оборудования, способного работать при низких частотах вращения, когда ротор еще можно рассматривать как жесткий.

Зачастую использование серийных балансировочных станков, например, выпускаемых такими известными производителями, как «Шенк» (Германия), «ДИАМЕХ» (Россия) и других, для балансировки изделий, выпускаемых малыми партиями, малоэффективно, поскольку они обычно предназначены для балансировки конкретных конструкций в массовом производстве. Адаптация серийных балансировочных станков под задачу балансировки конических роторов требует применения дополнительной технологической оснастки, как правило, громоздкой, сложной в изготовлении, существенно снижающей точность измерений. К тому же диапазон рабочих частот вращения балансировочных станков, используемых в крупносерийном и массовом производстве, зачастую начинается от 6–10 Гц и выше. Поэтому вполне оправданным решением задачи балансировки в мелкосерийном производстве, с экономической точки зрения, является применение специализированных балансировочных станков (стендов), учитывающих конструктивные и технологические особенности балансируемых объектов [6].

В статье представлены схема и конструктивно-технологические характеристики низкочастотного вертикального динамического балансировочного стенда с газовыми опорами. Стенд обеспечивает прецизионное определение параметров массоинерционной асимметрии длинномерных тел вращения, представляющих собой сложный тонкостенный модуль конической формы, имеющий единственную действительную (штатную) плоскость коррекции, конструктивно расположенную на торце конуса, и возможность последующего приведения этих параметров (при необходимости) к значениям, не превышающим заданных предельно-допустимых значений.

Конструкция стенда

Балансировочный стенд, в соответствии с рис. 3, содержит фундамент 1 с вертикальной стойкой 2, на которой консольно закреплены нижняя и верхняя колебательные подвески 3 и 4, выполненные конструктивно идентичными, удерживающие соответственно нижнюю и верхнюю опоры 5 и 6, реализованные в виде конических газостатических подшипников с щелевыми ограничителями

расхода воздуха (достоинством таких газостатических подшипников является то, что ограничители щелевого типа практически не засоряются). Соосность подшипников обеспечивается конструкцией стенда [7, 8]. Также на вертикальной стойке закреплен свободный конец оптоволоконного световодного жгута 7, являющегося составной частью фотоэлектронного датчика (ФД). ФД выполнен в виде дискретной оптоэлектронной схемы и включает также в свой состав светодиодный излучатель и фотоприемник. Световодный жгут обеспечивает вывод генерируемого излучателем светового пучка в направлении, перпендикулярном цилиндрической части боковой поверхности технологического переходника 8, на которой закреплен зеркальный отражатель 9, а также передачу отраженного светового пучка к фотоприемнику. ФД используется как в качестве датчика угловой скорости, так и в качестве отметчика фазы дисбалансов. Срабатывание ФД происходит на каждом обороте ротора при появлении зеркального отражателя перед торцом свободного конца световодного жгута. В качестве ФД используется оригинальный датчик, обеспечивающий реализацию сформулированного выше принципа действия [9, 10].

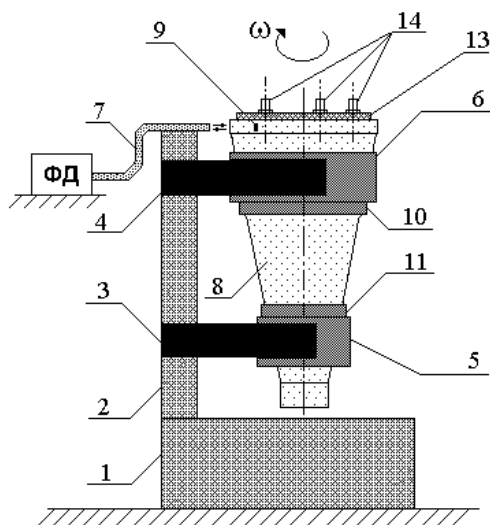


Рис. 3. Стенд для балансировки конических роторов в динамическом режиме:
13 – профилированная крышка; 14 – резьбовые фиксирующие шпильки

Верхний газостатический подшипник совмещен с пневматическим приводом 10, выполненным в виде пневматического механизма разгона загруженного на опоры объекта контроля, а нижний подшипник – с пневматическим механизмом торможения 11. Пневматические механизмы разгона (пневмопривод вращения) и торможения (пневмотормоз) выполнены с тангенциально расположенными пазами. На рис. 4, где приведено сечение по пневмоприводу, показаны тангенциальные пазы 12, служащие для изменения направления подаваемого в них сжатого воздуха при разгоне ротора. Пневмотормоз отличается обратной ориентацией пазов для подачи воздуха. Алгоритм работы измерительно-управляющей системы стенда исключает возможность одновременной подачи сжатого воздуха в пневмопривод и пневмотормоз. Подача сжатого воздуха через тангенциальные пазы производится по касательной к поверхности контролируемого объекта, чем обеспечивается минимизация времени его раскрутки или торможения.

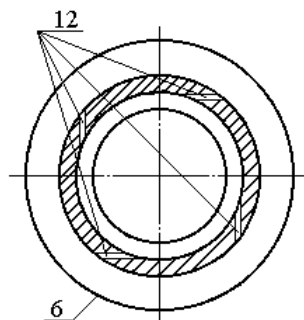


Рис. 4. Сечение по пневмоприводу разгона ротора:
6 – верхний газостатический подшипник

Конструктивная схема колебательной подвески приведена на рис. 5. Каждая подвеска представляет собой единую деталь, образованную двумя параллельными упругими пластинами 15 и общим массивным основанием 16. Между пластинами консольно закреплен газостатический подшипник. На массивных основаниях каждой колебательной подвески выполнены жесткие базовые выступы на расстоянии, равном примерно 1/5 длины пластин, от массивного основания. На одном из базовых выступов размещен пьезоэлектрический датчик силы генераторного типа 17, а на втором – соосно с датчиком силы – металлическая втулка 18, контактирующая с упругими консольными пластинами [6, 11]. Выбор пьезоэлектрических датчиков обусловлен их высокими метрологическими характеристиками и надежностью в работе, а также отсутствием необходимости в обеспечении электрического питания датчиков.

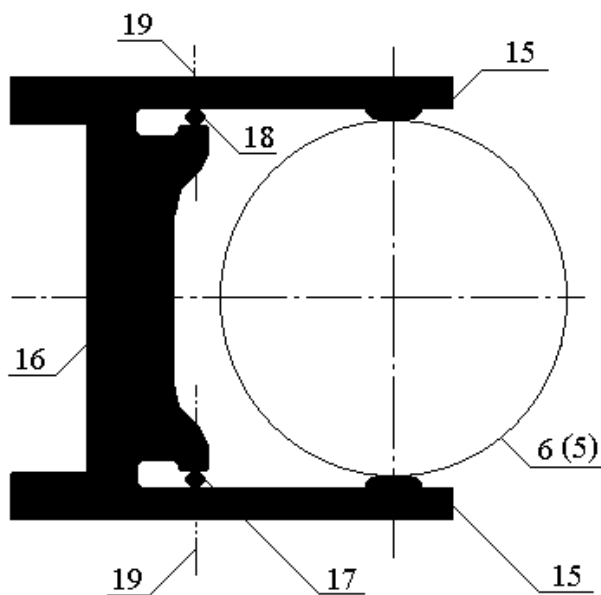


Рис. 5. Колебательная подвеска:
6 (5) – условное обозначение верхнего (нижнего) газостатического подшипника

Конструкцией подвески обеспечивается расположение оси чувствительности 19 датчика силы и металлической втулки, параллельное по отношению к направлению вибрации газостатического подшипника, вызванной вращением в подшипнике неуравновешенного ротора. Втулки по своим массовым и геометрическим характеристикам, а также по характеристикам жесткости соответствуют аналогичным характеристикам датчиков силы и используются для придания симметричности конструкции подвесок. Датчики и втулки поджимают винтами (не показаны) с идентичным усилием затяжки. Выполнение упругих пластин заодно с собственным основанием (из цельного куска металла) обеспечивает повышение точности измерений параметров ответной реакции упругой подвески на возникающий дисбаланс, а также повышает стабильность этих измерений при колебаниях температуры. Размещение датчиков силы на жестких базовых выступах оснований, а также плечо установки, равное 1/5 длины пластины, увеличивают чувствительность измерительной схемы, по которой включены силоизмерительные датчики, что, в свою очередь, также повышает точность измерений вибраций опор.

Технологический переходник в соответствии с рис. 6 представляет собой жесткий тонкостенный полый кожух конической формы, внутри которого установлен торцом кверху и зафиксирован балансируемый ротор 20. Наружная поверхность переходника взаимодействует с газостатическими подшипниками через воздушные зазоры. Внутренняя поверхность переходника снабжена базовыми опорами, предназначенными для установки балансируемого ротора на его опорные поверхности 25. Верхняя базовая опора 21 переходника выполнена неподвижной, а нижняя базовая опора 22 выполнена подвижной вдоль продольной оси для обеспечения осевого базирования роторов, имеющих разброс геометрических параметров. Посредством винтов (не показаны) к верхнему торцу переходника прикрепляется профилированная крышка 13. Профилированная крышка с помощью трех резьбовых фиксирующих шпилек 14, расположенных равномерно по окружности крышки, обеспечивает

осевую фиксацию балансируемого ротора, устанавливаемого внутри переходника. На верхнем и нижнем торцах переходника равномерно по окружности выполнены резьбовые отверстия (не показаны) для крепления пробных грузов [8, 11].

Применение технологического переходника позволяет балансировать роторы различной геометрии без смены подшипников, исключить возможность механического контакта контролируемого изделия с балансирующим оборудованием, а также материализует вторую плоскость коррекции, что необходимо для настройки измерительной системы стенда, выполняемой в ходе каждого балансирующего эксперимента. В качестве указанной второй (нижней) плоскости коррекции используется нижний торец 23 переходника (при этом в качестве первой – верхней – используется штатная плоскость коррекции 24 испытуемого ротора).

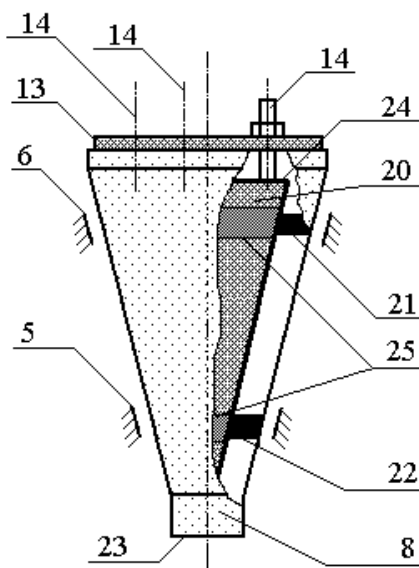


Рис. 6. Сборный ротор: 5, 6 – условное обозначение газостатических подшипников; 8 – технологический переходник; 14 – резьбовые фиксирующие шпильки

В качестве рабочего тела используется сжатый воздух, поступающий из заводской пневмосети низкого давления (0,6 МПа) в зазор между сопрягаемыми поверхностями подшипников опор и переходника через щелевые ограничители расхода, а также в пневмопривод и пневмотормоз. Использование газовой смазки исключает сухое трение между сопрягаемыми поверхностями и износ рабочих поверхностей подшипников. Перед проведением балансирующего эксперимента должны быть определены (с применением другого оборудования и других средств измерений) масса, продольное положение центра масс, а также значения аксиального и экваториального моментов инерции контролируемого ротора, необходимые для использования при проведении последующего балансирующего расчета.

При подготовке балансирующего эксперимента, после подачи сжатого воздуха в газостатические подшипники и установки на подшипники технологического переходника, на внутренние опоры переходника устанавливают ротор и фиксируют его с помощью крышки и резьбовых шпилек. Образованный таким путем сборный ротор испытывает минимальное трение и прецизионно центрируется в газостатических подшипниках по наружной поверхности переходника (зазоры не менее 0,05 мм). Также наличие слоя газовой смазки исключает механический контакт наружных поверхностей переходника с рабочими поверхностями газостатических подшипников.

Контролируемое изделие на стенде балансируется как отдельная деталь в составе сборного ротора [12]. В процессе балансирующего эксперимента выполняют серию пусков – в исходном состоянии сборного ротора и с пробными грузами известной массы, поочередно прикрепляемыми в известных угловых положениях к верхней и нижней плоскостям коррекции. Результаты измерений с пробными грузами используют для определения балансируемых коэффициентов – коэффициентов балансирующей чувствительности измерительной системы, коэффициентов взаимовлияния плоскостей коррекции и фазовых сдвигов сигналов дисбалансов [13, 14]. Для исключения паразитных дисбалансов, обусловленных использованием технологического переходника в составе сборного ро-

тора, измерения вибраций опор в исходном состоянии ротора проводят в двух фиксированных угловых положениях контролируемого ротора относительно переходника, отличающихся друг от друга на 180° . При этом полученные результаты измерений усредняют, выделяя дисбалансы контролируемого ротора, действующие в плоскостях коррекции [14, 15].

Регистрация и обработка измерительных сигналов

В каждом пуске балансировочный стенд работает следующим образом. Сжатый воздух подает в пневмопривод вращения, который за небольшое время (примерно 2–3 мин) плавно раскручивает сборку до скорости вращения, превышающей рабочую на $\sim 15\text{--}20\%$, после чего подачу воздуха в пневмопривод прекращают. При этом исчезают вибрации, вызванные работой пневмопривода, и сборка, свободно вращаясь в газовых опорах, начинает медленно затормаживаться под действием сил тяжести и сил трения. Началом регистрации является сигнал от ФД, поступивший в измерительную систему при достижении заданной рабочей частоты вращения (неизменной для всех пусков в течение всего балансировочного эксперимента) на выбеге сборного ротора. Сигнал от ФД однозначно определяет ориентацию системы координат технологического переходника относительно системы координат балансировочного стенда. По окончании регистрации вибросигналов, подачей сжатого воздуха в пневмотормоз, за время от 3 до 4 мин осуществляют плавное торможение сборки до полного останова. В каждом пуске измерения вибраций опор проводятся на выбеге сборного ротора, при достижении заданной рабочей частоты вращения.

Повышенная точность измерений параметров сигналов дисбалансов обеспечивается ограничением времени регистрации вибросигналов и использованием преобразования Фурье для выделения сигналов из аддитивной смеси с помехой. В частности, вибросигналы, поступающие в измерительную систему стенда, регистрируют параллельно, одновременно от обоих силоизмерительных датчиков, в течение времени, равного 4–5 полным оборотам сборного ротора. При этом изменение частоты вращения, происходящее за время регистрации, составляет пренебрежимо малую величину, не превышая $0,4\text{--}0,5\%$ от значения рабочей частоты. Также следует отметить, что при вращении в опорах несбалансированного тела, кроме его дисбалансов, на опоры действуют вибрации, вызванные силами, изменяющимися в широком частотном диапазоне. Причинами возникновения таких паразитных вибраций могут быть неидеальность сопрягаемых поверхностей технологического переходника и газостатических подшипников, неравномерность воздушных зазоров между сопрягаемыми поверхностями, акустические резонансы, возникающие в результате многократных отражений воздуха подводимого сжатого воздуха при прохождении воздушных потоков через колена пространственно-изогнутых напорных трубопроводов, собственные резонансы колебательной системы, определяемые колеблющимися массами, жесткостью воздушной пленки в зазорах, разделяющих сопрягаемые поверхности, трибоэлектрические эффекты в измерительных кабелях и др. В результате хорошо известная особенность используемых пьезоэлектрических датчиков, связанная с их высокой чувствительностью к помехам промышленного характера, приводит к тому, что на входе приемника вибросигналов присутствует сложная смесь сигналов с очень большим разбросом по амплитуде, что требует принятия специальных мер для борьбы с помехами и выделения полезного сигнала [16].

Для выделения полезных сигналов, пропорциональных действующим в плоскостях коррекции дисбалансам, в составе измерительной системы разработан и функционирует аппаратно-программный алгоритм регистрации и обработки вибросигналов, обеспечивающий значительное расширение динамического диапазона измерений сигналов и повышение добротности фильтра (до 160–200 единиц добротности). Структурная схема измерительного канала, а также временные диаграммы и частотные спектры сигналов, иллюстрирующие алгоритм обработки входного вибросигнала и выделения полезного сигнала, несущего информацию о параметрах дисбаланса, приведены на рис. 7. Алгоритм заключается в том, что первоначальный вибросигнал, поступающий от пьезоэлектрического датчика силы, установленного в верхней или нижней опоре, и содержащий сигналы помех, подвергается предварительной аналоговой обработке, обеспечивающей импедансное согласование с входом приемника (через посредство предварительного усилителя напряжения, обладающего высоким входным сопротивлением), аналоговую низкочастотную фильтрацию и усиление. Затем сигнал оцифровывается и в течение непродолжительного (2–3 с) промежутка времени регистрируется в дискретно-временной форме в оперативной памяти компьютера, входящего в состав измерительной системы стенда. Регистрация вибросигналов, поступающих от обоих датчиков силы, иницииру-

ется сигналом от ФД и выполняется параллельно, по двум независимым измерительным каналам. Для проведения аналоговой обработки сигналов по описанному выше алгоритму в системе используется оригинальный прибор [10].

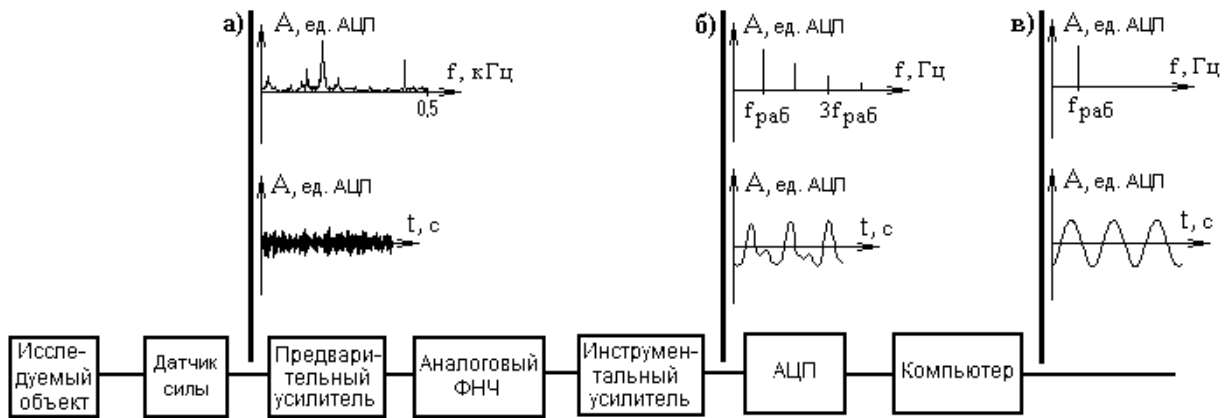


Рис. 7. Алгоритм регистрации и обработки вибросигналов: ФНЧ – фильтр низких частот; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Дальнейшая обработка зарегистрированных сигналов с целью выделения дискретных составляющих с частотой, равной рабочей частоте вращения, производится в постреальном режиме, после проведения всей серии пусков сборного ротора и регистрации всех цифровых реализаций вибросигналов. В процессе обработки исходный сигнал сначала раскладывается в ряд Фурье, затем генерируется частотная характеристика полосового фильтра с частотой пропускания, равной частоте вращения сборного ротора, и частотное представление ряда Фурье перемножается на характеристику фильтра, после чего к результату перемножения применяется процедура обратного преобразования Фурье, получая на выходе синусоидальный сигнал с частотой, равной частоте вращения ротора, не содержащий пульсаций и налагающейся частоты, который принимается за основной (полезный) измерительный сигнал. Далее определяются амплитуды и фазы выделенных полезных сигналов, после чего с использованием балансировочных коэффициентов рассчитываются значения и угловые положения дисбалансов \vec{D}_B и \vec{D}_H , действующих, соответственно, в верхней и нижней плоскостях коррекции [16, 17].

Балансировка

Балансировочный расчет проводят по результатам определения параметров дисбалансов \vec{D}_B и \vec{D}_H . В процессе расчета определяют параметры, характеризующие асимметричность распределения масс контролируемого тела (как и любой вектор, параметры определяются значением и угловым положением), по формулам [4, 11, 18]:

$$\vec{\rho} = \frac{\vec{D}_B + \vec{D}_H}{M}; \quad \vec{\alpha}_x = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2(\vec{D}_B x_B - \vec{D}_H x_H)}{\Delta I},$$

где M – масса тела; $\Delta I = I_3 - I_a$ – разность между экваториальным I_3 и аксиальным I_a моментами инерции тела; x_B и x_H – расстояния от центра масс тела до верхней и нижней плоскости коррекции соответственно. Затем при необходимости корректировки массы контролируемого тела с целью приведения параметров массо-инерционной асимметрии к заданным нормативам дальнейший расчет массы и углового положения балансировочного груза (грузов) в штатной плоскости коррекции может быть выполнен с использованием алгоритма, обеспечивающего оптимизацию по критерию достижения минимального значения одним из контролируемых параметров асимметрии, описанного в работе [19]. После корректировки массы тела выполняют пуски для контроля значений остаточных параметров массо-инерционной асимметрии. А в случае если по результатам проведенного балансировочного расчета выявлена невозможность достижения заданных нормативов статической и

моментной балансировки, процесс уравнивания прекращается, а объект контроля направляется изготовителю на перекомпоновку.

Метрологическое обеспечение

Для проведения работ по тестированию нормируемых метрологических характеристик балансировочного станда, которые должны выполняться с определенной периодичностью, станд оснащается рабочим эталоном для каждого типа контролируемых изделий и набором контрольных грузов. Рабочий эталон представляет собой металлическое тело вращения конической формы и является массогабаритным макетом контролируемого изделия, массоцентровочные и инерционные характеристики, а также базовые посадочные поверхности которого соответствуют указанным характеристикам и поверхностям изделия. Контрольные грузы представляют собой резьбовые втулки известной массы, предназначенные для установки в резьбовые отверстия, имеющиеся на плоскостях коррекции. Прикрепление контрольных грузов к плоскостям коррекции, расположенным на противоположных торцах эталонного ротора, позволяет смоделировать различные эталонные значения массо-инерционных параметров в заданных диапазонах их измерений. Измерения эталонных значений выполняют по методике выполнения штатных измерений при проведении балансировочного эксперимента. Оценку точности измерений проводят по результатам сравнения измеренных и смоделированных значений параметров массо-инерционной асимметрии [20, 21].

Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили возможность балансировки тонкостенных длинномерных тел конической формы при небольших рабочих частотах вращения (до 2 Гц) и определения величины поперечного смещения центра масс и угла отклонения продольной ГЦОИ относительно геометрической оси с погрешностями, не превышающими соответственно 0,01 мм и 1 угловой минуты [21, 22]. Это в пять и более раз превышает точность измерений тех же параметров на стандах, реализующих весовой и маятниковый методы измерений. Высокая точность измерений определяется конструкцией балансировочного станда, вертикальным расположением оси вращения, использованием газовой смазки, экспериментальной настройки станда на контролируемое изделие, применением комбинированного фильтра вибросигналов с применением процедуры Фурье-фильтрации. Созданная на основе станда автоматизированная система контроля прошла испытания и имеет сертификат об утверждении типа средств измерений № 32831. Простота и функциональность, относительно высокая производительность станда позволяют сбалансировать тело или произвести его отбраковку (в случае доказательства невозможности достижения заданных нормативов балансировки, полученного в ходе проведения балансировочного расчета) за время, не превышающее 1,5–2 ч, что позволяет применять станд в серийном производстве.

Список литературы

1. Левит М. Е., Рыженков В. М. Балансировка деталей и узлов. М. : Машиностроение, 1986. 248 с.
2. Ключников А. В. Перспективы использования балансировочного оборудования в задаче контроля характеристик массоинерционной асимметрии БПЛА // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского : тр. XIII Всерос. науч.-техн. конф. (г. Москва, 14–15 апреля 2016 г.). М. : Изд. дом Академии имени Н. Е. Жуковского, 2016. С. 67–71.
3. Ключников А. В., Васильев М. А., Патокина Н. Е. [и др.]. Конструкции и пути совершенствования систем контроля характеристик геометрии масс летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 3. С. 105–114.
4. Основы балансировочной техники. Т. 1. Уравнивание жестких роторов и механизмов / под ред. В. А. Щепетильникова. М. : Машиностроение, 1975. 527 с.
5. Современные методы балансировки машин и приборов / под ред. В. А. Щепетильникова. М. : Машиностроение, 1985. 232 с.
6. Абышев Н. А., Ключников А. В. К вопросу оптимизации выбора стандового оборудования, используемого для уравнивания летательных аппаратов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2020. № 3. С. 77–85.
7. Патент 2292533 РФ МПК G 01M 1/02. Балансировочный станд с вертикальной осью вращения / Глазырина Л. М., Карповицкий М. С., Ключников А. В., Мальгин А. И., Смирнов Г. Г., Фомин Ю. П. № 2004112999/28А ; заявл. 27.04.2004 ; опубл. 27.01.2007, Бюл. № 3.

8. Абышев Н. А., Ключников А. В., Михайлов Е. Ф., Чертков М. С. Стенд для прецизионной бесконтактной балансировки конических роторов в динамическом режиме // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2014. Т. 2. С. 234–236.
9. Ключников А. В., Кузнецов А. В., Лысых А. В. [и др.]. Особенности контроля частоты вращения в процессе балансировки летательных аппаратов на динамическом стенде // Радиовысотометрия : труды IV Всерос. науч.-техн. конф. (г. Каменск-Уральский, 22–24 октября 2013 г.). Екатеринбург : Форт Диалог-Исеть, 2013. С. 195–198.
10. Ключников А. В. Обработка измерительных сигналов в процессе динамической балансировки летательного аппарата // Вестник воздушно-космической обороны. 2019. № 1. С. 86–92.
11. Абышев Н. А., Андреев С. В., Ключников А. В. Конструктивные особенности стенда для диагностики характеристик асимметрии масс летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 1. С. 39–45.
12. Патент 2292534 РФ МПК G 01 М 1/04. Способ балансировки ротора / Глазырина Л. М., Карповицкий М. С., Ключников А. В., Мальгин А. И., Смирнов Г. Г., Фомин Ю. П. № 2004112998/28А ; заявл. 27.04.2004 ; опубл. 27.01.2007, Бюл. № 3.
13. Патент 2453818 РФ МПК G 01 М 01/22. Способ настройки балансировочного стенда для определения параметров массо-инерционной асимметрии роторов / Ключников А. В. № 2011100182/28А ; заявл. 11.01.2011; опубл. 20.06.2012, Бюл. №17.
14. Ключников А. В. Методическое обеспечение процесса индивидуальной настройки динамического балансировочного стенда на объект контроля // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии : тр. XIV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Сочи, 1–10 октября 2017 г.). М. : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2017. С. 382–386.
15. Ключников А. В. Способ устранения влияния технологической оснастки на результаты измерений в процессе динамической балансировки летательного аппарата // Решетневские чтения : материалы XIX Междунар. науч. конф. (г. Красноярск, 10–13 ноября 2015 г.) : в 2 ч. Красноярск : СибГАУ, 2015. Ч. 1. С. 21–23.
16. Pliykh V. V., Klyuchnikov A. V., Chertkov M. S., Shagimuratov M. D. To the issue about slowing down of sensitivity to the industrial hindrances of a measuring system of counterbalancing stand, created with use of gas supports // Innovative Information Technologies : materials of the IV International scientific-practical conference (Prague, Cech Republic, April 24–28, 2017). Moscow : Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2017. P. 614–617.
17. Абышев Н. А., Ключников А. В., Шагимуратов М. Д. Компенсация погрешностей дисбалансов, вызванных фазовыми сдвигами измерительных сигналов балансировочного стенда // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 7. С. 15–18.
18. Ключников А. В. Уточненная математическая модель оценки и обеспечения параметров массо-инерционной асимметрии длинномерного роторного модуля // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2012. Т. 1. С. 224–227.
19. Ключников А. В. Особенности процедуры уравнивания длинномерного тела в единственной плоскости коррекции дисбалансов на вертикальном балансировочном стенде // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 83–90.
20. Патент 2434212 РФ МПК G 01 М 1/04. Способ проверки качества функционирования низкочастотного динамического балансировочного стенда / Ключников А. В., Фомин Ю. П. № 2010106845/28А ; заявл. 24.02.2010; опубл. 20.11.2011; Бюл. № 32.
21. Ключников А. В., Лысых А. В., Чертков М. С. Метрологические аспекты модели уравнивания летательного аппарата на динамическом балансировочном стенде // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2015. № 1. С. 43–48.
22. Klyuchnikov A. V. Verification of dynamic balancing stand accuracy parameters // Innovative Information Technologies : Materials of the V International scientific-practical conference (Prague, Cech Republic, April 23–27, 2018). Moscow : Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2018. P. 454–459.

References

1. Levit M.E., Ryzhenkov V.M. *Balansirovka detaley i uzlov = Balancing of parts and assemblies*. Moscow: Mashinostroenie, 1986:248. (In Russ.)
2. Klyuchnikov A.V. Prospects for the use of balancing equipment in the task of controlling the characteristics of mass-inertia asymmetry of UAVs. *Nauchnye chteniya po aviatsii, posvyashchennye pamyati N.E. Zhukovskogo: tr. XIII Vseros. nauch.-tekhn. conf. (g. Moskva, 14–15 aprelya 2016 g.) = Scientific readings on aviation dedicated to the memory of N. E. Zhukovsky : proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Technical conf. (Moscow, April 14–15, 2016)*. Moscow: Izd. dom Akademii imeni N.E. Zhukovskogo, 2016:67–71. (In Russ.)
3. Klyuchnikov A.V., Vasil'ev M.A., Patokina N.E. et al. Designs and ways of improving control systems for the characteristics of the geometry of the masses of aircraft. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(3):105–114. (In Russ.)

4. Shchepetil'nikov V.A. (ed.). *Osnovy balansirovochnoy tekhniki. T. 1. Uravnoveshivanie zhestkikh rotorov i mekhanizmov = Fundamentals of balancing technology. Vol. 1. Balancing rigid rotors and mechanisms*. Moscow: Mashinostroenie, 1975:527. (In Russ.)
5. Shchepetil'nikov V.A. (ed.). *Sovremennyye metody balansirovki mashin i priborov = Modern methods of balancing machines and devices*. Moscow: Mashinostroenie, 1985:232. (In Russ.)
6. Abyshev N.A., Klyuchnikov A.V. On the issue of optimizing the choice of bench equipment used for balancing aircraft. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz-Antey» = Bulletin of the Concern of East Kazakhstan Region "Almaz-Antey"*. 2020;(3):77–85. (In Russ.)
7. Patent 2292533 Russian Federation, MPK G 01M 1/02. *Balansirovochnyy stend s vertikal'noy os'yu vrashcheniya = Balancing stand with vertical axis of rotation*. Glazyrina L.M., Karpovitskiy M.S., Klyuchnikov A.V., Mal'gin A.I., Smirnov G.G., Fomin Yu.P. No. 2004112999/28A; appl. 27.04.2004; publ. 27.01.2007, bull. № 3. (In Russ.)
8. Abyshev N.A., Klyuchnikov A.V., Mikhaylov E.F., Chertkov M.S. Stand for precision contactless balancing of conical rotors in dynamic mode. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2014;2:234–236. (In Russ.)
9. Klyuchnikov A.V., Kuznetsov A.V., Lysykh A.V. et al. Features of speed control in the process of balancing aircraft on a dynamic stand. *Radiovysotometriya: trudy IV Vseros. nauch.-tekhn. konf. (g. Kamensk-Ural'skiy, 22–24 oktyabrya 2013 g.) = Radio altimetry : proceedings of the IV All-Russian scientific-technical. conf. (Kamensk-Uralskiy, October 22–24, 2013)*. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset', 2013:195–198. (In Russ.)
10. Klyuchnikov A.V. Processing of measuring signals in the process of dynamic balancing of an aircraft. *Vestnik vozdušno-kosmicheskoy oborony = Bulletin of Aerospace Defense*. 2019;(1):86–92. (In Russ.)
11. Abyshev N.A., Andreev S.V., Klyuchnikov A.V. Design features of the stand for diagnostics of mass asymmetry characteristics of aircraft. *Aviakosmicheskoe priboroostroenie = Aerospace instrumentation*. 2015;(1):39–45. (In Russ.)
12. Patent 2292534 Russian Federation, MPK G 01 M 1/04. *Sposob balansirovki rotora = Rotor balancing method*. Glazyrina L.M., Karpovitskiy M.S., Klyuchnikov A.V., Mal'gin A.I., Smirnov G.G., Fomin Yu.P. No. 2004112998/28A; appl. 27.04.2004; publ. 27.01.2007, bull. № 3. (In Russ.)
13. Patent 2453818 Russian Federation, MPK G 01 M 01/22. *Sposob nastroyki balansirovochnogo stenda dlya opredeleniya parametrov masso-inertsionnoy asimmetrii rotorov = A method for setting up a balancing stand to determine the parameters of the mass-inertial asymmetry of rotors*. Klyuchnikov A.V. No. 2011100182/28A; appl. 11.01.2011; publ. 20.06.2012, bull. № 17. (In Russ.)
14. Klyuchnikov A. V. Methodological support for the process of individual adjustment of the dynamic balancing stand to the object of control. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii: tr. XIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Sochi, 1–10 oktyabrya 2017 g.) = Innovative, information and communication technologies : Proceedings of the XIV International scientific and practical conference (Sochi, October 1–10, 2017)*. Moscow: Assotsiatsiya vypusknikov i sotrudnikov VVIA im. prof. Zhukovskogo, 2017:382–386. (In Russ.)
15. Klyuchnikov A.V. A way to eliminate the influence of technological equipment on measurement results in the process of dynamic balancing of an aircraft. *Reshetnevskie chteniya: materialy XIX Mezhdunar. nauch. konf. (Krasnoyarsk, 10–13 noyabrya 2015 g.): v 2 ch. = Reshetnev readings : materials of the XIX International Scientific Conference (Krasnoyarsk, November 10–13, 2015) : in 2 parts*. Krasnoyarsk: SibGAU, 2015:(part 1):21–23. (In Russ.)
16. Ilyiykh V.V., Klyuchnikov A.V., Chertkov M.S., Shagimuratov M.D. To the issue about slowing down of sensitivity to the industrial hindrances of a measuring system of counterbalancing stand, created with use of gas supports. *Innovative Information Technologies: materials of the IV International scientific-practical conference (Prague, Czech Republic, April 24–28, 2017)*. Moscow: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2017:614–617.
17. Abyshev N.A., Klyuchnikov A.V., Shagimuratov M.D. Compensation of errors of imbalances caused by phase shifts of measuring signals of the balancing stand. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2019;(7):15–18. (In Russ.)
18. Klyuchnikov A.V. A refined mathematical model for estimating and providing parameters of mass-inertial asymmetry of a long-dimensional rotary module". *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2012;1:224–227. (In Russ.)
19. Klyuchnikov A.V. Features of the procedure for balancing a long body in a single plane of correction of imbalances on a vertical balancing stand. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):83–90. (In Russ.)
20. Patent 2434212 Russian Federation, MPK G 01 M 1/04. *Sposob proverki kachestva funktsionirovaniya nizkочастотного динамического балансирующего стента = Method for checking the quality of functioning of a low-frequency dynamic balancing stand*. Klyuchnikov A.V., Fomin Yu.P. No. 2010106845/28A; appl. 24.02.2010; publ. 20.11.2011; bull. № 32. (In Russ.)

21. Klyuchnikov A.V., Lysykh A.V., Chertkov M.S. Metrological aspects of the aircraft balancing model on a dynamic balancing stand. *Vestnik Kontserna PVO «Almaz-Antey» = Bulletin of the Air Defense Concern Almaz-Antey*. 2015;(1):43–48. (In Russ.)
22. Klyuchnikov A.V. Verification of dynamic balancing stand accuracy parameters. *Innovative Information Technologies: Materials of the V International scientific-practical conference (Prague, Czech Republic, April 23–27, 2018)*. Moscow: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2018:454–459.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Васильевич Ключников

кандидат технических наук, главный специалист,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru

Aleksandr V. Klyuchnikov

Candidate of technical sciences, chief specialist,
Russian Federal Nuclear Centre – All-Russia Research
Institute of Technical Physics named after Academician
E.I. Zababakhin
(13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 07.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 19.01.2023

Принята к публикации/Accepted 16.02.2023