

Челпанов Игорь Борисович

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Доктор технических наук, профессор
Chelpanov Igor Borisovich
St.-Petersburg state polytechnical university
Professor
E-Mail: igorchelp@yandex.ru

Евстифеев Михаил Илларионович

ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Начальник отдела
Доктор технических наук
Evstifeev Mikhail Illarionovich
JSC Kontsern Central Research Institute Elektropribor
Head of department
E-Mail: mevstifeev@eprib.ru

Кочетков Андрей Викторович

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Доктор технических наук, профессор
Kochetkov Andrey Viktorovich
Perm national research polytechnical university
Professor
E-Mail: soni.81@mail.ru

05.02.05 - Роботы, мехатроника и робототехнические системы

**Роторное стендовое оборудование для испытаний
микромеханических приборов**

Rotor bench equipment for tests of micro mechanical devices

Аннотация: Рассматривается проблематика и комплекс вопросов испытаний основных автономных датчиков навигационных приборов, комплексов и систем, в первую очередь гироскопов, как датчиков угловой скорости (ДУС), а также акселерометров, измеряющих составляющие гравитационного и линейного ускорения.

Abstract: The perspective and complex of questions of tests of the main independent sensors of navigation devices, complexes and systems, first of all gyroscopes, as sensors of angular speed, and also the accelerometers measuring components of gravitational and linear acceleration is considered.

Ключевые слова: Датчики; преобразователь; классификация; микромеханический датчик; гироскоп.

Keywords: Sensors; converter; classification; micromechanical sensor; gyroscope.

Введение

Рассматривается проблематика и комплекс вопросов испытаний основных автономных датчиков навигационных приборов, комплексов и систем, в первую очередь гироскопов, как *датчиков угловой скорости (ДУС)*, а также акселерометров, измеряющих составляющие гравитационного и линейного ускорения. Основное внимание уделяется датчикам, получившим в последние годы самое широкое распространение, имеющим относительно невысокие показатели точности, но имеющие малые массы, габаритные размеры. Такие датчики, именуемые по принципу действия микромеханическими, микроэлектронномеханическими или микроэлектромеханическими (*iMEMS: integrated Micro Electro Mechanical system*), чувствительные элементы которых изготавливаются методами, используемыми в современной микроэлектронике, эти датчики в комплекте с электроникой довольно дешевы и поэтому получают все более широкое распространение. Общим для ДУС и акселерометров является то, что эти датчики являются автономными, их принцип действия в конечном счете основывается на использовании в своих чувствительных элементах сил инерции, возникающих при абсолютных ускорениях; поэтому эти датчики часто называют инерциальными.

Постановка задачи

Сначала необходима систематизация требований к стендам и связи этих требований с условиями эксплуатации приборов. В качестве исходного положения следовало бы принять, что стендовые испытания должны отражать условия эксплуатации. Но реальные условия эксплуатации всегда являются сложными, комбинированными. На подвижных объектах вращение сопровождается угловыми и линейными колебаниями, угловые скорости переменны, вибрации сопровождаются ударами и пр. В истории создания испытательной аппаратуры бывали периоды, когда обращалось особое внимание на проработку возможностей воспроизведения на стендах именно сложных, комбинированных воздействий, записанных аппаратурой в конкретных реальных условиях эксплуатации изделий. Например, они могут воспроизводить воздействия близких взрывов, землетрясения, аварии и пр. Помимо того, существуют стенды, задающие совместно воздействия различной природы в различных сочетаниях, например, механические, климатические, электромагнитные и пр.

При обычных, например, приемо-сдаточных, сертификационных испытаниях наоборот, в соответствии с нормативными документами разных уровней испытательные воздействия различного вида должны воспроизводиться по отдельности, при этом предъявляются высокие требования к «чистоте» воспроизведения, например, вращение вокруг точно определенной оси, с выдерживанием постоянства или воспроизведением номинальных законов изменения угловой скорости или других кинематических величин и т.п..

Применительно ко всем видам требуется обеспечение единства испытаний в том смысле, что при правильной и достаточно полной формулировке требований к испытаниям испытательные воздействия должны быть с достаточной точностью идентичными, и их результаты должны хорошо воспроизводиться, если подробно оговорены и однозначно определены методики и требования.

Методика решения

Ниже приведена таблица 1, в которой указаны основные виды испытаний ДУС, в частности ММГ, на отдельные виды воздействий и названо необходимое, обычно используемое типовое испытательное оборудование.

Таблица 1

Основные виды испытаний ДУС

	Определяемые характеристики или свойства	Задаваемые воздействия при испытаниях	Испытательное оборудование (стенды)
1	Смещение нуля, дрейф, шум	-	Неподвижное основание
2	Статическая характеристика, масштабный коэффициент, нелинейность, поперечная чувствительность	Постоянные значения угловой скорости	Роторный стенд для воспроизведения серий постоянных угловых скоростей
3	Динамические характеристики, порог чувствительности	Программные законы изменения угловой скорости (в первую очередь, синусоидальные)	Роторный стенд программного воспроизведения угловых скоростей
4	Влияние постоянных линейных ускорений	Постоянные линейные перегрузки	Центрифуга
5	Виброустойчивость, вибропрочность и выявление резонансов	Виброускорения и силы инерции	Вибростенды
6	Удароустойчивость и ударопрочность	Ударные импульсы	Ударные стенды
7	Влияние изменений температуры и/или давления	Задание определенных уровней или законов изменения температуры	Термокамеры или термобарокамеры с программным управлением

В обычных программах приемо-сдаточных и контрольных испытаний в дополнение к этому предусматривается определение ряда других параметров, например, времени выхода на рабочий режим после включения или восстановления режима после ударного воздействия, расходуемой мощности, влияния отклонений напряжения питания, электробезопасности и пр. Для проведения таких испытаний используются только обычные средства измерений, используются стандартизованные методики, специальные стенды не требуются, и в дальнейшем эти виды испытаний в этом разделе не рассматриваются.

Наибольшие трудности в смысле необходимости очень больших затрат времени (порядка нескольких месяцев или года) представляют испытания на такие показатели надежности, как долговечность или долговременная стабильность. В некоторых случаях необходимо обеспечивать «идеальные» в определенном смысле условия. Например, иногда нужна стабилизация с высокой точностью температуры среды; применительно к испытаниям ДУС или акселерометров сверхвысокой точности к неподвижному основанию по п. 1 табл. 1 могут предъявляться особые требования, например, установки на специальные массивные фундаменты, однако для приборов средней и низкой точности подобные требования не выдвигаются.

В табл.1 указаны поворотные или роторные стенды для воспроизведения измеряемой физической величины для ДУС – угловой скорости, для акселерометра центробежного ускорения, которое, в свою очередь также выражается через угловую скорость. Место установки ДУС на столе стенда при определении калибровочной характеристики (зависимости выходного сигнала от угловой скорости) обычно несущественно, во всех точках стола стенда угловая скорость одна и та же. При испытаниях на воздействие центробежных сил корпуса датчиков должен быть определенным образом базированы, чтобы было точно известно расстояние до оси вращения.

Большинство роторных стендов одноосные и при испытаниях на них, как правило, предусматриваются задание угловой скорости только вокруг одной оси. Многоосные (двух- или трехосные) стенды, выполняемые по схеме карданова шарнира и предназначенные, например, для воспроизведения сложной качки судна, тоже существуют, но здесь они не рассматриваются. Привод современного роторного стенда обычно строится по принципу следящей системы с точным, обычно импульсным датчиком угла в обратной связи. Для признания результатов испытаний на всех, в том числе на высоких уровнях необходимо, чтобы стенды были аттестованы. Важно, чтобы стенды были аттестованы не по программно задаваемому углу поворота, а по угловой скорости.

При построении статической характеристики ДУС (зависимости выходного сигнала от измеряемой угловой скорости) по данным калибровки по образцовой мере обычно требуется, чтобы на стенде можно было длительно и точно воспроизводить угловые скорости в заданном диапазоне, постоянные в течение заданных интервалов времени или изменяющиеся во времени по заданным законам. При калибровке ДУС по образцовой мере (мерой является сам стенд) точность поддержания указанных угловых скоростей относительно задаваемых значений должна быть выше точности калибруемого ДУС. При калибровке акселерометров должна быть обеспечена высокая точность определения и угловой скорости, и радиального расстояния. Обычно точность выдерживания постоянных значений угловых скоростей выше для больших программных значений, на очень малых угловых скоростях часто существенна неравномерность вращения.

Важнейшими показателями поворотных стендов, воспроизводящих угловые скорости и предназначенных преимущественно для калибровки ДУС, являются диапазон воспроизводимых угловых скоростей (ω_{\min} , ω_{\max}) и погрешности этого воспроизведения. Нижняя граница по угловой скорости определяется требуемой чувствительностью испытуемого прибора, верхняя граница - максимальными значениями угловой скорости объекта, для которого предназначается прибор. Для поворотных стендов, предназначенных для аттестации и поверки самолетных датчиков угловой скорости, нижняя граница угловой скорости часто имеет порядок угловой скорости вращения Земли, т.е. 15⁰/час (а погрешность должна быть порядка на два меньше), а верхняя граница имеет порядок 200⁰/с, динамический диапазон (отношение $\omega_{\max}/\omega_{\min}$) при этом имеет порядок 10⁵. Только немногие, самые лучшие роторные стенды могут перекрыть этот диапазон, поэтому чаще стенды проектируются группами, обычно парами, на нижний и на верхний поддиапазоны.

Количественно для стендов, предназначенных для калибровки ММГ, задаются границы диапазона воспроизводимых угловых скоростей в обе стороны: верхние - несколько оборотов в секунду (± 1000 ⁰/с), нижние - порядка 10⁻⁴ об/с (0,03 ⁰/с), а приведенная погрешность должна быть не более 10⁻⁵ об/с (0,003 ⁰/с). Несколько западных фирм (например, Acutronics) выпускает подобные стенды, они относятся к дорогостоящему оборудованию, но проведенные на них испытания признаются на всех уровнях. Указанные требования тяжелые, поэтому часто предпочитают создавать и использовать пару стендов: один на большие

угловые скорости (от нескольких единиц до 10^{-2} об/с), а другой на малые угловые скорости (от 10^{-2} об/с до 10^{-5} об/с).

Требования к точности воспроизведения угловых скоростей требуют уточнения: или для мгновенных значений, или для средних значений за период либо за определенное число периодов (например, за десять). Чем на большем числе периодов нормируется точность стенда, тем легче выполнить эти требования. Это нужно учитывать при калибровке: более высокая точность построения калибровочной характеристики достигается при получении каждой точки калибровочной характеристики на больших числах оборотов. Поэтому при испытаниях выдержки времени должны быть обратно пропорциональными угловой скорости. Дополнительные требования к роторным стендам многочисленны: строгое постоянство угловой ориентации оси (обычно по вертикали), низкий уровень вибраций, и пр.

При определении на поворотном стенде динамической характеристики ДУС необходимо воспроизводить синусоидальные законы изменения угловой скорости (колебания) различных частот, обычно в диапазоне до 100-200 Гц. При этом предельно возможные амплитуды по углу велики при низких частотах и уменьшаются с увеличением частоты. Обычно при определении динамических характеристик ДУС рекомендуется доводить частоты до значений, при которых амплитудно-частотная характеристика спадает по крайней мере на 25-35 % от начального значения, и тогда регистрируется частота среза. Однако при формировании сигнала погрешности и нормировании динамической погрешности одним коэффициентом по результату вычитания программных значений угловой скорости из измеренных достаточно задавать частоты по крайней мере на один или полтора порядка меньше, что позволяет снизить требования к частотному диапазону стенда.

При определении на поворотном стенде порога чувствительности требуется задавать ступенчатым образом требуемые малые приращения угловой скорости. Необходимо иметь возможность изменения высоты ступеней программно или по командам, задаваемым оператором. Крутизна фронта ступеней может быть существенной, но она не нормируется.

Объективное оценивание порога чувствительности может быть осуществлено при использовании схемы регистрации ступеней в выходном сигнала испытываемого прибора.

Для некоторых типов ДУС существенны дополнительные погрешности от ускорений в пределах $\pm g$, и тогда испытания с целью определения соответствующих коэффициентов влияния проводится просто переустановкой при поворотах датчика в различные положения относительно вертикали. Для создания больших перегрузок необходимы динамические установки. Для ДУС линейное ускорение является влияющим фактором, определяются или им вызванные дополнительные погрешности, или перегрузочная способность. Для акселерометров центрифуга осуществляет основные воздействия, на центрифуге производится калибровка заданием последовательностей значений центростремительных ускорений.

Однако при наличии естественного эталона (гравитационного поля Земли) для акселерометров существует другой путь калибровки: заданием наклона основания, при этом акселерометр измеряет составляющую ускорения силы тяжести $W_x = g \sin \alpha$, где α – угол наклона. С вполне достаточной точностью углы наклона задают на любой делительной головке. Пределы задания ускорения ограничены значениями $\pm g$. Два значения $\pm 1 g$ (две реперные точки) воспроизводятся для двух вертикальных положений измерительной оси при переворачивании акселерометра на 180° .

При этом не требуется высокая точность угловой ориентации измерительной оси по вертикали. Этот способ широко используется на практике, в особенности, когда акселерометр работает вместе с аналоговым усилителем, и важен общий коэффициент преобразования.

Отметим, что естественным «стендом» задания угловой скорости для ДУС является вращающаяся Земля, изменение составляющей угловой скорости достигается поворотами оси в плоскости меридиана. Однако диапазон ограничивается очень малой угловой скоростью Земли, и поэтому данный способ калибровки используется только для очень точных ДУС, на порядок более точных, чем ММГ.

Центрифуги представляют собой роторные стенды, предназначенные для воспроизведения центробежных ускорений при вращении и создания соответствующих им радиальных перегрузок силами инерции. Элементарная теория испытательной центрифуги строится на единственной формуле кинематики вращательного движения; при установке испытуемого прибора на платформе (роторе), вращающейся с угловой скоростью ω на расстоянии (радиусе) R от оси вращения центробежное ускорение в месте его установки определяется выражением

$$W = \omega^2 R \quad (1)$$

На рис. 1 на для трех значений радиуса R в логарифмической сетке построены зависимости ускорения W от угловой скорости ω (в рад/с и об/мин).

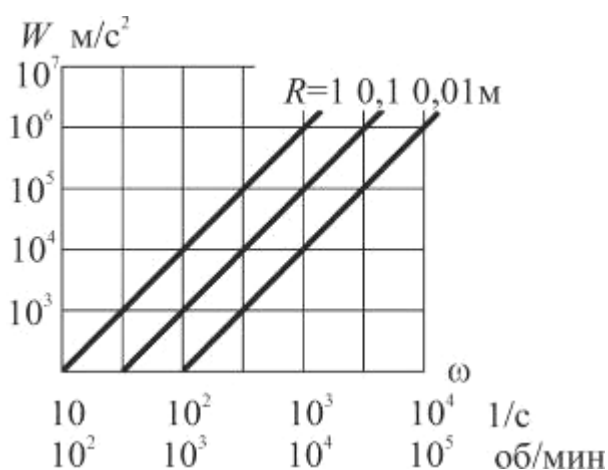


Рис. 1. Зависимости ускорения W от угловой скорости

Если использовать точную терминологию, то следует констатировать, что непосредственно воздействующей на испытуемый объект фактически является распределенная приложенная к основанию прибора центростремительная сила; равная и противоположная ей центробежная сила действует на установочную базу ротора стенда. Основными для испытательных центрифуг являются требования по максимальному воспроизводимому линейному ускорению, которое задается в м/с^2 или в единицах g ($1g = 9,8 \text{ м/с}^2$).

При испытаниях крупногабаритных приборных блоков радиус может значительно изменяться по объему. Если этот фактор существенен, плечо и следовательно габаритные размеры центрифуги стремятся делать возможно больше. Поэтому точные градуировочные центрифуги – крупногабаритные установки, занимающие целые помещения.

Например, государственный эталон единицы ускорения при вращательном движении имеет плечо около 3 м, известны роторные градуировочные стенды с большими радиусами порядка 5 м, для них требуются большие площади, нужны мощные двигатели и т.д. Если требование равномерности центробежных ускорений в больших объемах не выдвигается, что естественно для испытаний микросхемной техники, лучше использовать установки с меньшими значениями радиусов, как показано далее, у них имеются еще и другие преимущества.

Калибровка акселерометра по образцовой мере (центрифуге) осуществляется сравнением линейного ускорения при точно задаваемой на стенде угловой скорости с его выходным сигналом; при этом должна быть высокая точность измерения угловой скорости и радиуса.

Выражения для абсолютной и приведенной погрешностей ΔW линейного ускорения (1) точки ротора центрифуги, смещенной на радиальное расстояние ΔR относительно известного положения, задаваемого радиусом R_0 , имеют вид

$$\Delta W = \omega_0^2 \Delta R + 2R_0\omega_0 \Delta\omega; \Delta W/W_0 = \Delta R/R_0 + 2 \Delta\omega/\omega_0, \quad (2)$$

где ω_0 — номинальное значение угловой скорости, а $\Delta\omega$ — ее погрешность. По этой формуле оценивается погрешность калибровки, которая должна быть ниже погрешности калибруемого акселерометра. Точные градуировочные (калибровочные) центрифуги должны иметь относительные погрешности не более $10^{-3} \%$, поэтому в несколько раз меньшими должны быть относительные погрешности радиуса и угловой скорости.

Применительно к ДУС является важным, что вращение платформы центрифуги одновременно создает измеряемую величину (угловую скорость) и влияющий фактор (линейное ускорение и соответствующую перегрузку). Однако большие перегрузки (выше 100 g) создаются при больших угловых скоростях, заведомо выходящих за пределы диапазона измерения. Поэтому испытания ДУС на центрифугах проводятся за пределами рабочих режимов измерения угловой скорости.

Как и для роторных стендов, задающих угловую скорость, точная стабилизация угловой скорости вполне достижима при использовании прецизионных импульсных датчиков в замкнутой системе автоматического управления.

Но необходимо говорить отдельно о точности мгновенных значений угловой скорости и о точности осредненной угловой скорости; они обычно существенно различаются, чем больше число оборотов осреднения, тем выше точность. За несколько десятков оборотов погрешность осредненной угловой скорости может быть снижена до пренебрежимо малых значений.

К испытательным центрифугам, предназначенных для определения предельно допустимых перегрузок или контроля прочности конструкции различных приборов не нужно предъявлять жесткие требования по точности воспроизведения центробежных ускорений (эти требования вполне правильны и обоснованы применительно к центрифугам при калибровке акселерометров), поскольку реальные эксплуатационные условия, которые желательно воспроизводить, все равно обладают значительной естественной неопределенностью.

Часто для прецизионных градуировочных (калибровочных) центрифуг задаются ограничения на удлинение, увеличение радиуса под действием центробежных сил. Применительно к градуировочным центрифугам способ измерения во время вращения длины плеча с последующим введением поправок на воспроизводимое ускорение нужен при калибровке высокоточных акселерометров, но используется редко ввиду его сложности. Возможно введение только расчетных поправок на удлинение плеча в зависимости от воспроизводимого ускорения, это, конечно, значительно проще, но могут иметь место существенные, трудно учитываемые погрешности неадекватности расчетной модели.

Существенную специфику имеют центрифуги, предназначенные для испытаний на очень большие центробежные перегрузки при центростремительных ускорениях порядка 10^5 м/с² и более.

При таких и бóльших ускорениях элементы самой конструкции вращающегося ротора испытывают такие нагрузки от центробежных сил инерции, что если даже они изготовлены из

высококачественных конструкционных материалов, в их сечениях могут достигаться пределы несущей способности.

При установлении возможностей воспроизведения на центрифуге таких очень больших ускорений основными являются требования обеспечения достаточных запасов прочности; определяющим является расчет на прочность протяженных частей роторов. Эти протяженные части нагружены вблизи оси центробежными силами не только от объекта и устройства его крепления, но и самой конструкции протяженной части.

Наибольшие по конструкции механические напряжения пропорциональны максимальному значению W_{\max} воспроизводимого центростремительного ускорения и радиусу R установки испытуемого объекта, от отношения допускаемого напряжения к плотности. Но также влияют схемные и конструктивные решения роторов. Отчетливые преимущества имеют те конструкции, в которых протяженные элементы роторов работают только на растяжение, но не на изгиб.

Возможности воспроизведения очень больших линейных ускорений на центрифугах определяются условиями прочности конструкции ротора. Исходя из условий прочности ротора при растяжении для всех конструктивных решений показано, что независимо от схемного решения и его конструкции должно быть выполнено условие

$$R W_{\max} = \beta (\omega_{\max} R)^2 = \beta (V_{\max})^2, \quad (3)$$

где безразмерный коэффициент β имеет порядок единицы, W_{\max} - максимально возможное ускорение, а $V_{\max}^2 = (\sigma_{\text{доп}} \rho^{-1})$ - квадрат максимально допустимой окружной скорости, которая зависит исключительно от свойств материала (допускаемого напряжения $\sigma_{\text{доп}}$ и плотности ρ). Для титана, как и для высококачественных стальных сплавов ограничение на скорость V_{\max} находится на уровне 200 – 400 м/с.

Важно, что параметры R и W_{\max} входят в виде произведения, поэтому с точки зрения обеспечения условий прочности при растяжении трудности, связанные с увеличением как R , так и W_{\max} , одинаковы. Чем меньше радиус R , тем большее ускорение W_{\max} можно получить на центрифуге. Это важный довод, чтобы создавать и использовать малогабаритные центрифуги.

На диаграмме рис. 2 на плоскости параметров W и R в логарифмической сетке выделена область, для которой может быть обеспечена прочность ротора центрифуги. Пунктир показывает границу для специальных конструктивных решений

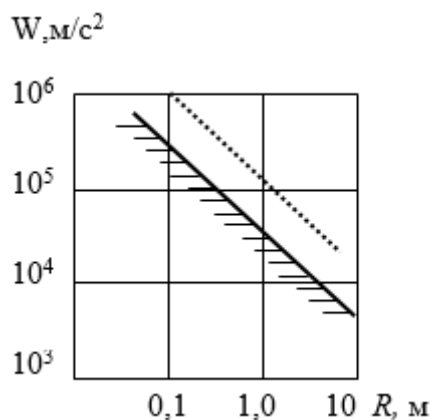


Рис. 2. Область, для которой может быть обеспечена прочность ротора центрифуги

При оценке существующих центрифуг нельзя, например, рассматривать, как выдающееся достижение получение на центрифуге ускорения, например, 100000 м/с² без

пояснения, на каком радиусе это получено: при $R= 0,3$ м это не очень сложно, а при $R= 3$ м практически невозможно. Малые радиусы вполне допустимы для испытаний малогабаритных микромеханических приборов.

Существуют специальные технологические центрифуги, на которых воспроизводятся ускорения порядка 10^6 g, они имеют малые радиусы роторов. В частности, они используются для разделения изотопов радиоактивных элементов. Имеются и другие прецеденты. Фирма *Beckman Coulter* выпускает малогабаритные центрифуги *Optima MAX* и *Optima TXL*, правда технологические, а не испытательные, они воспроизводя ускорения до 10^7 м/с² или 10^6 g. Насколько известно, подобные центрифуги не используются для испытаний приборов, но подобная модернизация возможна применительно к малогабаритным приборам.

В точных калибровочных центрифугах используется прямая передача от специальных низкооборотных многополюсных двигателей, имеющих высокую степень равномерности (постоянства) вращающего момента по углу поворота. В настоящее время приводы всех центрифуг имеют высокоточные цифровые системы программного управления или стабилизации с обратными связями, в состав которых входят импульсные датчики угла.

При необходимости снятия выходных сигналов с испытываемых приборов во время вращения ротора могут использоваться любые средства бесконтактной телеметрии или контактной передачи через вращающиеся кольца, которых касаются упругие элементы, закрепленные на корпусе.

Допускаемые погрешности измерения угловых скоростей и линейных ускорений на стендах для разных испытываемых приборов могут изменяться в пределах от 0,1 % до 0,001 %. Высокая точность воспроизведения линейных ускорений требуется только для калибровки акселерометров, особенно прецизионных; при этом должно быть с очень высокой точностью известно расстояние от оси вращения до центра масс инерционного тела (подвижной массы), что вызывает очень серьезные трудности.

Для удовлетворения высоких требований по точности калибровки, когда это требуется, используется целая серия конструктивных приемов и способов настройки. При любом выполнении конструкция ротора должна быть очень жесткой, до пренебрежимо малых значений сводятся изгибные перемещения под действием сил веса и амплитуды колебаний. Большую роль играет выбор подшипников, многие точные роторные стенды выполняются с газостатическими опорами, которые при достаточно больших диаметрах имеют вполне достаточную жесткость; в них отсутствуют силы сухого трения, а вращение на них отличается плавностью. В конструкциях станин стендов предусматривается точное горизонтирование плоскости ротора, точная выставка оси вращения по вертикали.

Центрифуги для испытаний на прочность под действием центробежных сил выпускаются рядом известных фирм. Наиболее активно на российском рынке предлагаются китайские центрифуги *Tmc Solution*. Как пример специализированного стенда для испытаний полупроводниковых приборов можно привести центрифугу 9050 фирмы *WebTechnology* (США) с микропроцессорным управлением и программированием режимов (рис.3). Эта фирма также производит другое испытательное оборудование для микроэлектроники на разные воздействия в соответствии с американскими военными стандартами *MIL*. Наиболее важными из приводимых данных по этой центрифуге 9050 техническими характеристиками являются: максимальное линейное ускорение до 30 000 g, привод от электродвигателя постоянного тока с шунтовой обмоткой 20000 об/мин, мощностью 4 кВт. В качестве важной особенностью конструкции упоминается цилиндрический полуторадноймовый защитный бесшовный стальной корпус, обеспечивающий надежную защиту при возможном разрушении ротора. Фото открытой камеры центрифуги приведено на рис.3. Радиус ротора или расстояние

установочных мест размещаемых приборов не указывается, но, судя по изображениям, от близок к 0,1 м. Рабочие параметры для одного цикла тестирования фиксируются и отображаются на дисплее блока управления. Предусмотрены многочисленные функции контроля и управления



Рис. 3. Центрифуга 9050 фирмы WebTechnology (США) с микропроцессорным управлением и программированием режимов

Во время цикла тестирования, дисплей блока управления отображает информацию о желаемой и фактической динамической нагрузке, выставленное и фактическое число оборотов в минуту, время простоя и радиус теста. Модель центрифуги 9050 разработана для длительного надежного использования, даже при интенсивном рабочем режиме три смены в день семь дней в неделю (непрерывная эксплуатация). Отметим, что не приводятся какие-либо сведения о точности задания угловых скоростей, что вполне оправдано, поскольку радиальное расстояние R объекта испытаний до оси вращения все равно известно лишь с большой относительной погрешностью, а специальные средства точного измерения этого расстояния, по-видимому, отсутствуют.

Выводы

Рассмотрены вопросы планирования, организации и проведения испытаний микромеханических датчиков и приборов, в том числе микромеханических гироскопов, входящих в состав навигационных систем и комплексов подвижных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Евстифеев М.И. Теория и методы расчета упругих подвесов инерциальных чувствительных элементов приборов навигации. Докторская диссертация. - СПб: ЦНИИ Электроприбор, 2007.
2. Челпанов И.Б. Автоматические технологические машины и оборудование. Испытания машин. СПб, изд. СПбГПУ, 2008. - 296 с.
3. Евстифеев М.И., Розенцвейн Д.В., Челпанов И.Б. Анализ прочности упругих подвесов микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. – 2009. – №.3 – С.22-34.
4. Евстифеев М.И., Степанов О.А., Челпанов И.Б. Испытания микромеханических приборов. Учебное пособие. - Санкт-Петербург : Издательство ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2013. - 210 с.

Рецензент: Овчинников Игорь Георгиевич, профессор, доктор технических наук, заместитель руководителя Поволжского отделения Российской академии транспорта.