

Д. М. КАЛИХМАН, Е. А. ДЕПУТАТОВА, С. В. ПЧЕЛИНЦЕВА, В. О. ГОРБАЧЕВ

## КОНЦЕПЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КЛАССА ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВОРОТНЫХ СТЕНДОВ С ИНЕРЦИАЛЬНЫМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ В ЦЕПИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

*В статье рассмотрена концепция проектирования прецизионных стендов для контроля гироскопических приборов с цифровой системой управления и инерциальными чувствительными элементами в качестве современных мехатронных систем управления. На основании этих систем можно формировать поверочные схемы государственных первичных эталонов угловых скоростей, откуда как частные случаи могут выработываться схемотехнические решения иерархически подчиненных им эталонов, в которых также содержатся инерциальные чувствительные элементы и цифровые системы управления. К последним можно отнести схемотехнические решения, как ранее предложенные авторами, так и новые, разработанные на основе предлагаемых принципов их построения.*

**Ключевые слова:** государственный первичный эталон, мехатронная система, цифровая система управления, измеритель угловой скорости, акселерометр, прецизионный поворотный стенд, эталон.

### Введение

Технологии бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) находят все более широкое применение во всех областях навигационной техники – начиная от авиационных, космических и морских систем и заканчивая пешеходной навигацией [1, 2]. Развиваются и инерциальные чувствительные элементы (ИЧЭ) [3] – первичные измерители БИНС, причем все большее распространение получают измерители угловой скорости на новых физических принципах: лазерные (ЛГ) [4], волоконно-оптические (ВОГ) [5–7], волновые твердотельные [8–13] гироскопы (ВТГ) и на эффекте ядерного магнитного резонанса (ЯМГ) [14–17]. В перспективе должны получить развитие измерители, основанные на волнах де Бройля, или волнах материи [18].

Отличительной особенностью современных приборов является отсутствие зависимости их базовых точностных характеристик: погрешности масштабного коэффициента и случайной составляющей дрейфа как в запуске, так и между ними –

---

**Калихман** Дмитрий Михайлович. Доктор технических наук, профессор кафедры технической механики и мехатроники, Саратовский государственный технический университет (СГТУ) имени Гагарина Ю.А. (г. Саратов). Председатель Саратовского отделения международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». ORCID 0000-0002-3295-2108.

**Депутатова** Екатерина Александровна. Кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и мехатроники, СГТУ имени Гагарина Ю.А. Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». ORCID 0000-0001-8870-8107.

**Пчелинцева** Светлана Вячеславовна. Кандидат технических наук, доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А.. ORCID 0000-0003-0230-780X.

**Горбачев** Валерий Олегович. Кандидат технических наук, доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А.

от диапазона измерения, что типично для электромеханических приборов, у которых эти параметры определялись трением и тяжением в датчике момента [19, 20]. Именно поэтому прецизионные электромеханические измерители угловой скорости с газодинамической опорой ротора и магнитным центрированием его подвеса имели диапазон измерения не выше  $3^\circ/\text{с}$  при погрешности масштабного коэффициента 0,0005 % и случайной составляющей дрейфа в запуске не ниже  $0,001^\circ/\text{ч}$  [3, 19, 20]. Базовые технические характеристики современных устройств не хуже упомянутых выше, диапазоны измерения у ВОГ и ЛГ составляют более  $100^\circ/\text{с}$ , а у ВТГ и ЯМГ могут достигать до нескольких тысяч  $^\circ/\text{с}$  [3]. Это означает, что прецизионные стенды для контроля гироскопических приборов подобного класса не могут строиться на тех же принципах, что и обычные высокоточные следящие системы – в их системе управления необходимо использовать прецизионные измерители угловой скорости (ИУС) и линейного ускорения (ИЛУ).

В монографиях [21, 22] теоретически обосновано применение ИЧЭ и предложены принципы построения схмотехнических решений стендов с ИЧЭ с аналоговыми системами управления. С развитием процессорной техники стало понятно, что современные стенды с ИЧЭ, как и сами ИЧЭ, должны быть оборудованы цифровыми системами управления (ЦСУ) [23–28]. Авторы настоящей статьи ранее уже неоднократно обращались к этой проблеме [29–34], в том числе представляли доклады на международных конференциях по интегрированным навигационным системам и на метрологических международных симпозиумах [35–38]. Были предложены частные схмотехнические решения установок – эталонов, иерархически подчиненных государственному первичному эталону, воспроизводящему и хранящему единицу угловой скорости [39], которые приборостроительные предприятия могут изготовить самостоятельно, вместо того чтобы покупать дорогостоящее импортное оборудование, например прецизионные поворотные столы [40, 41].

Вместе с тем разрабатываемые иерархически подчиненные эталоны должны быть аттестованы при помощи государственного первичного эталона. Это означает, что и при создании первичных эталонов необходимо применять высокоточные ИЧЭ в контуре управления стендом. Кроме этого, с учетом высокой точности поверяемых приборов следует комплексировать информацию со всех первичных измерителей: высокоточных датчиков угла, прецизионных ИУС и ИЛУ, а в управляющем процессоре с современным программно-математическим обеспечением использовать для этого соответствующие алгоритмы. Таким образом, государственные первичные эталоны должны представлять собой современную прецизионную мехатронную систему с ИЧЭ различной физической природы, что позволяет существенно повысить ее точностные характеристики.

Статья посвящена принципам разработки подобной мехатронной системы, которую, по мнению авторов, должен представлять собой современный государственный первичный эталон задания и хранения угловой скорости. В качестве ИЧЭ в этой системе применяются 2 прецизионных ИУС с цифровыми обратными связями разной физической природы (например, прецизионные ВОГ [7] и ЛГ [4]), широкодиапазонные ИЛУ с цифровой системой управления [29, 30], высокоточные оптические датчики угла [42], а в управляющем процессоре – алгоритмы управления, позволяющие комплексировать информацию от первичных измерителей [22, 37, 43]. Из схмотехнического решения государственного первичного эталона как частные

случаи могут следовать схмотехнические решения иерархически подчиненных ему эталонов – как новые, так и ранее рассмотренные в научных работах [44, 45], классифицировать которые можно согласно [39].

### **Общий подход к формированию схмотехнических решений прецизионных стендов с ИЧЭ**

Схмотехнические решения прецизионных стендов с ИЧЭ и ЦСУ, представляющих собой современные мехатронные измерительные системы, основаны на том же принципе, что и государственный первичный эталон задания и хранения угловой скорости, из поверочной схемы которого как частные случаи получаются схмотехнические решения иерархически подчиненных ему эталонов, определяемых [39].

Главным отличием подобных мехатронных систем от классических, в основном применяющихся до настоящего времени, является то, что в последних для оценки величины задаваемой угловой скорости применялось деление измеренного оптическими датчиками значения угла на время. При задании малых угловых скоростей в сотые доли градуса в секунду продолжительность испытаний была достаточно большой, кроме того, данная информация об угловой скорости была единственной. В случае применения ИЧЭ в управляющий процессор поступают мгновенные значения угловой скорости от ИУС и их первых производных от ИЛУ, что существенно повышает точность измерений и сокращает время испытаний приборов. Этот факт объясняется тем, что мгновенное абсолютное значение угловой скорости измеряет ИУС, а ее первой производной – прецизионные акселерометры, информация с которых поступает в управляющий процессор. Оптический датчик угла, как и в существующих ныне стендах, измеряет интеграл угловой скорости, таким образом, информация приходит от прецизионных первичных измерителей различной физической природы, а система автоматического управления формируется как многоконтурная, что, согласно [46, 47], повышает ее точность. Алгоритмы обработки интегрированной информации в управляющем процессоре, как существующие в настоящее время, так и разрабатываемые [37], позволяют дополнительно повысить точность подобных мехатронных систем.

С учетом всех ранее полученных схемных и конструктивных решений построения прецизионных поворотных стендов можно составить алгоритм формирования из схемы государственного первичного эталона иерархически подчиненных ему эталонов, в частности различных вариантов схмотехнических решений построения стендов с ИЧЭ и ЦСУ, например в режиме «самоконтроля» [21, 22, 33, 45], одно- и двухгироскопного, широкодиапазонного с ЦСУ и ИУС и ИЛУ в качестве ИЧЭ [21, 22, 31, 32, 44, 48]. Общим для этих различных типов эталонов [39] является принцип применения ИЧЭ в цепи обратной связи стендов.

На рис. 1 приведена блок-схема, на примере которой показаны схмотехнические решения иерархически подчиненных эталонов, ранее разработанных авторами [21, 22, 31–33, 44, 45]. Они построены на основе общего схмотехнического решения формирования государственного первичного эталона, которое позволяет использовать многочисленные варианты сочетаний первичных измерителей в схмотехнических решениях иерархически подчиненных эталонов в зависимости от конкретных технических заданий (ТЗ), в том числе с учетом соотношения «качество–цена».

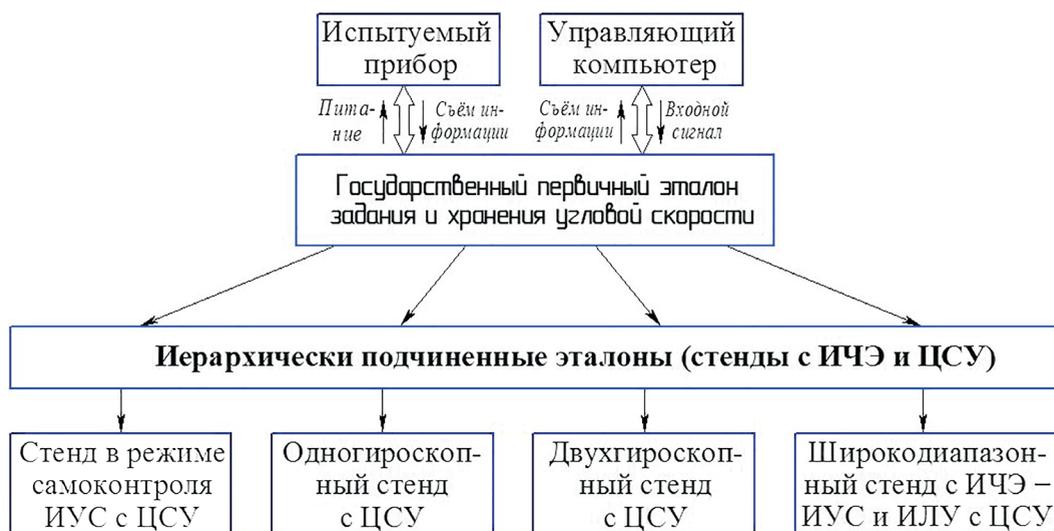


Рис. 1. Алгоритм формирования из схемы государственного первичного эталона задания и хранения угловой скорости иерархически подчиненных ему эталонов

### Обобщенное схемотехническое решение формирования государственного первичного эталона задания и хранения угловой скорости для проверки ИУС как прецизионной мехатронной системы с ИЧЭ и ЦСУ

На рис. 2 приведена предлагаемая функционально-кинематическая схема универсального стенда. Здесь и далее введены следующие обозначения:  $\omega_a$  – действительная угловая скорость вращения стенда; ИП – испытуемый прибор; УЭ – угловой энкодер с  $\nu$  оптическими считывающими головками; ИУС<sub>1</sub>, ИУС<sub>2</sub> – измерители угловой скорости с наилучшими точностными характеристиками по нестабильности нулевого сигнала (ННС) и нестабильности масштабного коэффициента (НМК) соответственно; ДВ – приводной двигатель; ТП – токоподвод; БПНП – блок преобразования напряжения питания; ИЛУ<sub>τ</sub><sup>n</sup>, ИЛУ<sub>ц</sub><sup>n</sup> – измерители линейного тангенциального и центростремительного ускорения точек их крепления к дополнительной платформе стенда в количестве  $n$  штук, соответственно обозначенных «τ» и «ц»; БПИ<sub>1</sub>, БПИ<sub>2</sub> – блоки преобразования информации; ЦСУ – цифровая система управления; УМ – усилитель мощности приводного двигателя;  $U_{вх}$  – входной сигнал, пропорциональный задаваемой угловой скорости вращения стенда  $\omega_{a0}$ ;  $U_{oc}$  – сигнал обратной связи контура стабилизации стенда.

В корпусе стенда на аэростатической опоре подвешен вал вертикальной оси вращения. На нем установлены платформа с испытуемым прибором, диск УЭ, траверса для крепления ИЧЭ стенда – ИУС<sub>1</sub>, ИУС<sub>2</sub> с необходимыми точностными характеристиками, подвижная часть ДВ, коллекторный узел ТП и дополнительная платформа с  $2n$  ИЛУ<sub>ц</sub><sup>n</sup>, ИЛУ<sub>τ</sub><sup>n</sup>, также являющимися ИЧЭ стенда. Кроме того, на подвижной части стенда закреплены в виде плат сервисная электроника измерителей (на рис. 2 не показаны), БПНП, блок БПИ<sub>2</sub> преобразования данных от ИП и ИЧЭ и беспроводной передатчик выходной информации. На неподвижной части стенда – корпусе установ-

лены в оптических головках УЭ, неподвижная часть ДВ, узел ТП, а также в виде плат закреплены БПИ<sub>1</sub> преобразования данных с УЭ и приемник сигналов ИП и ИЧЭ. Таким образом, информация со всех измерителей передается в ЦСУ и на управляющий компьютер бесконтактным способом, т.е. без использования коллектора, что снижает моменты трения по оси вращения стенов. Стрелками обозначено направление прохождения сигнала от одного блока к другому: тонкими стрелками – прохождение однопоточных сигналов, фигурными – прохождение потока различных сигналов.

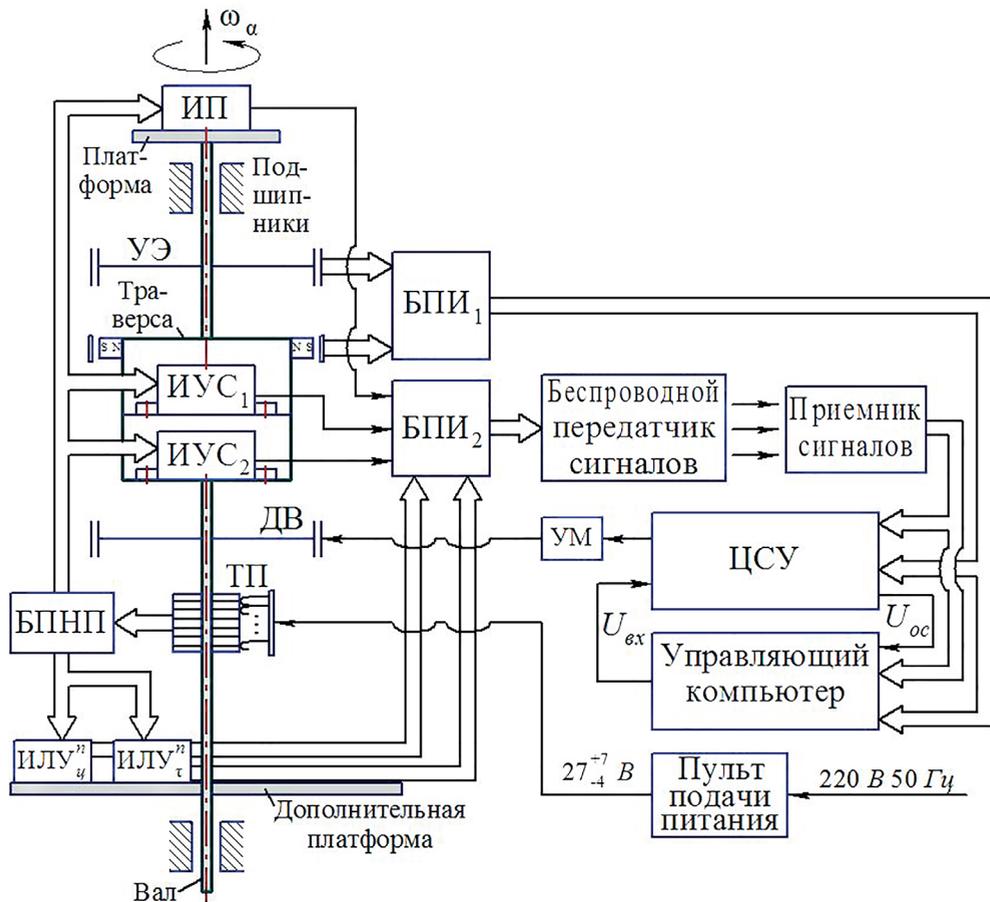


Рис. 2. Функционально-кинематическая схема универсального поворотного стенов с инерциальными чувствительными элементами – государственного первичного эталона задания и хранения угловой скорости

Поскольку поворотный стенов является наземным испытательным оборудованием, пульт подачи питания подключается к стандартной сети (220 В, 50 Гц). В пульте осуществляется преобразование переменного сетевого напряжения в постоянное  $27_{-4}^{+7}$  В, которое через коллектор поступает на БПНП, включающий вторичный источник питания, чтобы создать требуемые напряжения ( $\pm 5$  В,  $\pm 15$  В и др.) для работы функциональных элементов на подвижной части стенов, а также формирователь синхроимпульсов со встроенным генератором для образования нужных частот.

Принцип действия описываемого стенов заключается в следующем. От управляющего компьютера в цифровую систему управления стенов подается сигнал  $U_{вх}$  про-

порциональный задаваемой угловой скорости вращения  $\omega_{a0}$ . ЦСУ построена на базе процессорного модуля, имеющего в частности встроенный микроконтроллер, в котором производятся все вычисления, алгоритмическая коррекция сигналов, компенсация помех и т.п. Структурная схема ЦСУ приведена на рис. 3. В ЦСУ поступают сигналы с измерителей стенда и формируется сигнал обратной связи контура стабилизации  $U_{oc}$  о действительной скорости вращения стенда  $\omega_a$ .

На рис. 3 введены следующие обозначения:  $U_{уэ}$ ,  $U_{дх}$ ,  $U_{иус1}$ ,  $U_{иус2}$ ,  $U_{илуц}$ ,  $U_{илу\tau}$  – информационные сигналы соответственно УЭ, датчика Холла (только для иерархически подчиненных эталонов), измерителей угловой скорости и линейного ускорения.

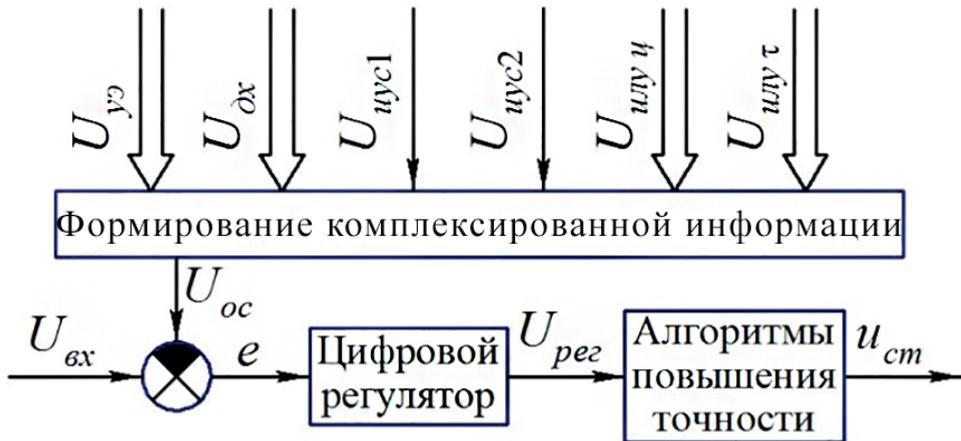


Рис. 3. Структурная схема ЦСУ

Сигналы  $U_{вх}$  и  $U_{oc}$  сравниваются и по разностному сигналу (ошибке стабилизации)  $e = U_{вх} - U_{oc}$  в цифровом регуляторе. Формируется управляющее воздействие  $u_{ст}$ , которое можно скорректировать за счет алгоритмов повышения точности. Оно поступает на усилитель мощности приводного двигателя, задающего вращение стенда с более высокой точностью. При этом сигнал обратной связи контура стабилизации выбирается таким образом, чтобы получить необходимый статический коэффициент передачи стенда как замкнутой системы (от входа  $U_{вх}$  к выходу  $\omega_a$ ), называемый коэффициентом преобразования, или масштабным коэффициентом, стенда  $K_{ст}$ , желаемое значение которого может быть определено как  $K_{ст} = \omega_{a0} / U_{вх}$ .

В управляющий компьютер передаются информация со всех измерителей стенда для регистрации и сигнал с испытуемого прибора для его аттестации. Как известно, компьютеры не обладают системой реального времени, поэтому формирование  $U_{oc}$  по сигналам различных измерителей необходимо выполнять в ЦСУ на базе процессорного модуля, имеющего высокоточный таймер для пересчета информации с датчика угла (как отношение измеренного угла ко времени опроса) и ИЛУ, как показано в [21, 22], в величину, пропорциональную угловой скорости. При этом в управляющем компьютере можно осуществлять калибровку статической характеристики ИП путем сопоставления его сигнала с информацией об  $U_{oc}$ , формируемой в ЦСУ.

Схемотехнические решения построения иерархически подчиненных эталонов получаются из рис. 2 за счет исключения соответствующих измерителей. Принцип действия данных эталонов остается неизменным, кроме стенда в режиме самокон-

троля, в котором ИП является и ИЧЭ стенов [21, 22]. При этом калибровка статической характеристики ИП в процессе его самоконтроля осуществляется в управляющем компьютере путем сопоставления полученной информации по сигналам датчика угла. Режим самоконтроля можно применить и в схеме государственного первичного эталона (см. рис. 2) на этапе калибровки ИЧЭ перед началом его работы. Необходимо отметить, что для эталонов высокой точности строго необходим подвес на аэростатических опорах, а в подчиненных им эталонах можно использовать и шарикоподшипниковый подвес как с механизмом отслеживания, так и без него, как показано в [21, 22].

Приведем в качестве примера функционально-кинематические схемы иерархически подчиненных эталонов с ЦСУ, ранее разработанные авторами и рассмотренные в работах [33, 44, 45], которые могут быть получены из схемотехнического решения формирования государственного первичного эталона (рис. 2) в полном соответствии с предложенной концепцией (рис. 1).

### **Пример функционально-кинематических схем и принцип работы стенов с инерциальными чувствительными элементами и цифровыми системами управления**

Функционально-кинематическая схема поворотного стенов, работающего в режиме самоконтроля, изображена на рис. 4. В корпусе стенов на шарикоподшипниках подвешена траверса, ось вращения которой вертикальна. На траверсе установлена платформа, предназначенная для крепления испытуемого ИУС и сервисной электроники, в качестве которого могут быть использованы ВТГ, ВОГ, ЛГ и другие инерциальные измерители. На оси вращения траверсы закреплена подвижная часть ДВ постоянного тока и диск УЭ – прецизионного датчика угла с разрешающей способностью не хуже 0,01 угл. с. На платформе также зафиксированы: БПНП, БПИ, в состав которого входят программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), используемая в случае цифрового выхода испытуемого ИУС, и аналого-цифровой преобразователь (АЦП), применяемый при аналоговом выходе ИУС, а также микроконтроллер, обеспечивающий передачу информации в последовательном коде по инфракрасному (ИК) или радиочастотному (РЧ) каналу. Отметим, что ИК- и РЧ-каналы взяты в качестве примера – в принципе может быть использован любой беспроводной передатчик сигналов, как это показано на рис. 2. Закрепление на платформе стенов плат, реализующих перечисленные блоки, и применение беспроводного канала связи позволяют сократить число линий коллектора до двух, необходимых для подвода питания к БПНП, что повышает точностные характеристики стенов.

На рис. 4 электронная часть системы управления, закрепленная на траверсе стенов, представлена БПИ, в который входит электроника, обеспечивающая обратную связь ИУС с сервисной электроникой, формирующая напряжение в цепи обратной связи, пропорциональное току в ней, и преобразующая его в цифровую информацию, годную для дистанционной передачи на управляющий процессор. На рис. 4 указаны функциональные электронные компоненты, с помощью которых можно реализовать функциональную схему при различных вариантах ИУС. Если измеритель имеет аналоговый выход, а БПИ оснащен микроконтроллером без встроенного АЦП (либо таковой имеется, но не обеспечивает необходимую разрядность), используют

внешний преобразователь. ПЛИС применяется, если микроконтроллеру не хватает счетчиков для приема цифровой информации ИУС. Следовательно, функциональная схема может быть реализована во многих вариантах.

Таким образом, на рис. 4 показано, что на корпусе стенда в виде плат закреплены электронная часть системы его управления, в состав которой входят: управляющий процессор с соответствующими портами ввода-вывода (ПВВ) 1–4, приемник ИК- или РЧ-сигналов, цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), усилитель мощности ДВ и преобразователь сигнала УЭ, выход которого соединен с одним из ПВВ процессора, причем последний соединен с ПВВ управляющего компьютера через стандартный интерфейс. Стрелками обозначено направление прохождения сигнала от одного блока к другому. Тонкие стрелки показывают прохождение однотипных сигналов; фигурные одно- и двунаправленные – потока различных сигналов от блока к следующему блоку и информационного обмена между функциональными блоками соответственно. Система работает следующим образом. С управляющего компьютера через ПВВ в процессор поступает (в виде цифрового кода) задающий сигнал  $U_{зад}$ , соответствующий заданной угловой скорости вращения платформы  $\omega_{\alpha 0}$ . Он сравнивается с сигналом обратной связи  $U_{oc}$  от испытуемого ИУС, пропорциональным действительной скорости вращения  $\omega_{\alpha}$  и формируемым в процессоре по сигналу  $y$  от РЧ- или ИК-приемника.

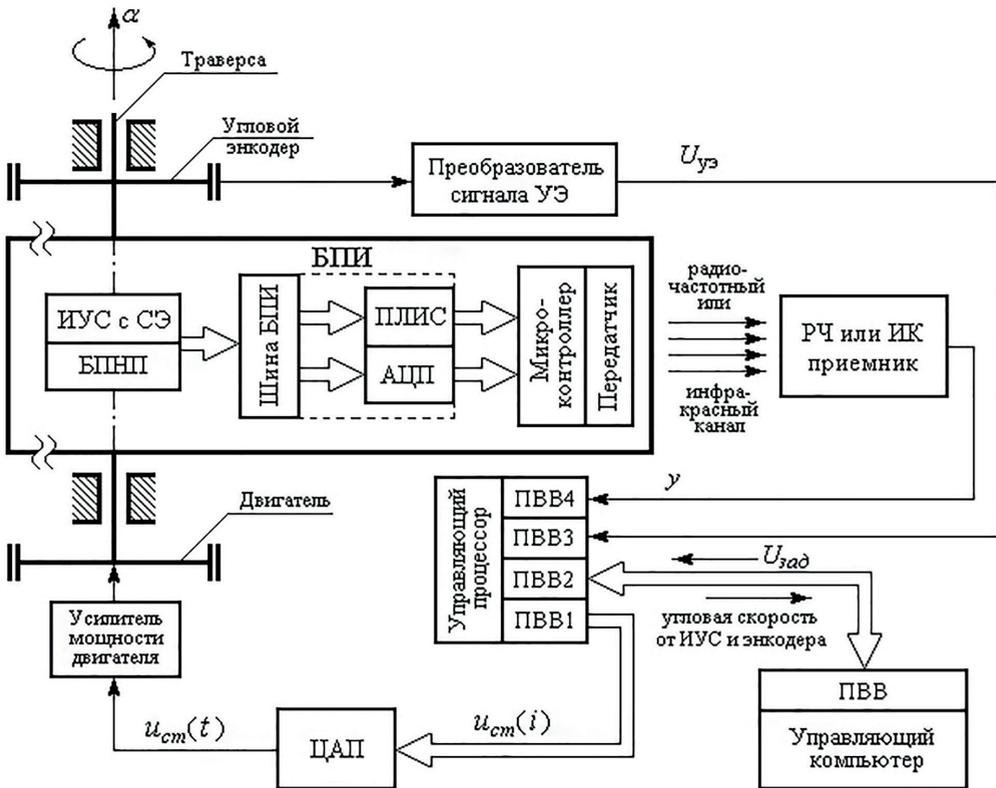


Рис. 4. Функционально-кинематическая схема стенда для контроля ИУС, находящегося в режиме самоконтроля

По разностному сигналу  $e = U_{\text{зад}} - U_{\text{о.с.}}$  в регуляторе контура стабилизации, реализованном в процессоре, формируется управляющее воздействие  $u_{\text{ст}}(i)$  в цифровом виде, которое преобразуется в ЦАП в аналоговое напряжение  $u_{\text{ст}}(t)$  и поступает на усилитель мощности ДВ, задающего вращение траверсе. При этом сигнал обратной связи контура стабилизации формируется в виде  $U_{\text{о.с.}} = k_{\text{о.с.}} \cdot y$ , где  $k_{\text{о.с.}}$  выбирается таким образом, чтобы получить необходимый статический коэффициент передачи управляемого основания как замкнутой системы (от входа  $U_{\text{зад}}$  к выходу  $\omega_{\alpha}$ ) – коэффициент преобразования стенда [22], желаемое значение которого может быть определено как  $K_{\text{ст}} = \omega_{\alpha 0} / U_{\text{зад}}$ . С УЭ через соответствующий преобразователь сигнала снимается последовательность импульсов, число которых пропорционально углу поворота платформы. Эти импульсы поступают в ПВВ управляющего процессора, где происходит вычисление угловой скорости платформы в виде отношения измеренного угла ко времени опроса, определяемого таймером процессора. Информация о вычисленной угловой скорости через ПВВ процессора попадает в управляющий компьютер. По тому же каналу поступают данные об угловой скорости от испытуемого ИУС – чувствительного элемента стенда. При этом калибровка статической характеристики испытуемого ИУС в процессе его самоконтроля осуществляется в управляющем компьютере путем сопоставления данных ИУС и УЭ.

Функционально-кинематическая схема широкодиапазонного стенда с ЦСУ и ИЧЭ – ИУС и ИЛУ приведена на рис. 5.

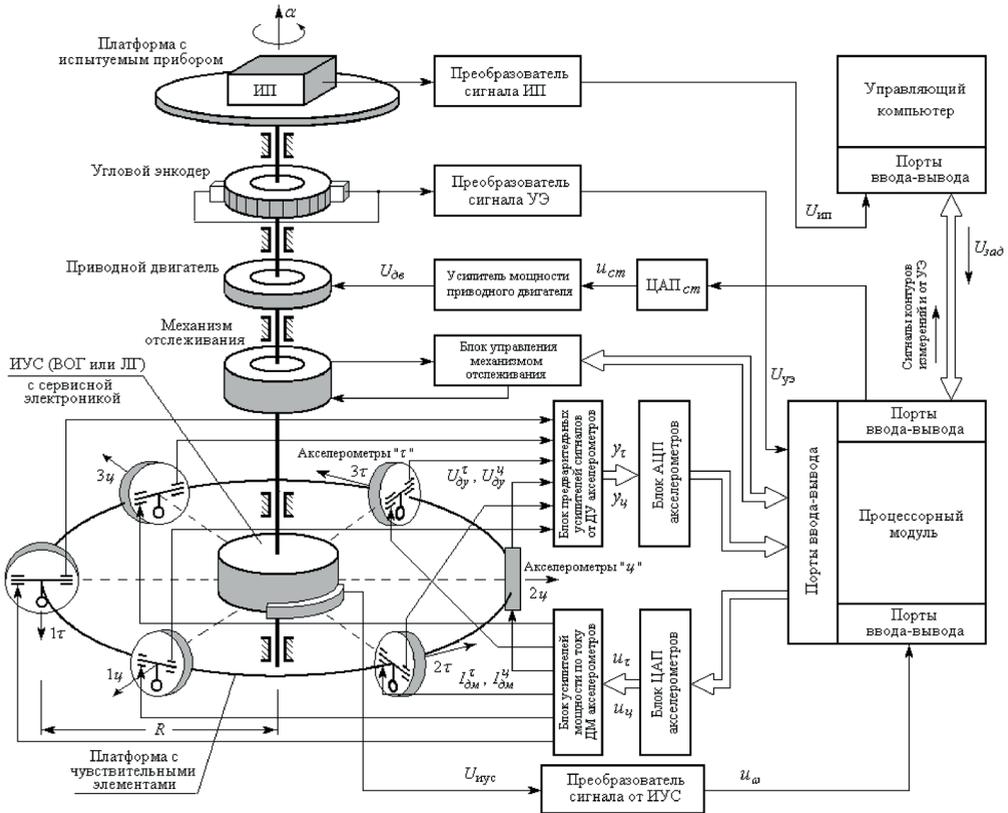


Рис. 5. Широкодиапазонный стенд с ИЧЭ – ИУС и ИЛУ и ЦСУ

В корпусе стенда на шарикоподшипниках установлен вал, на котором крепится основная платформа, предназначенная для размещения ИП, и вспомогательная платформа с чувствительными элементами системы. В качестве последних служат ВОГ или ЛГ (может также быть использован и ВТГ) и шесть ИЛУ – одинаковых маятниковых кварцевых акселерометров, закрепленных на расстоянии  $R$  от центра вращения. Три из них, отмеченные как  $1\tau$ ,  $2\tau$ ,  $3\tau$ , предназначены для измерения тангенциального ускорения (оси чувствительности перпендикулярны радиусам их крепления), а оставшиеся три –  $1\zeta$ ,  $2\zeta$ ,  $3\zeta$  – для измерения центростремительного ускорения (оси чувствительности ориентированы вдоль соответствующих радиусов крепления). Углы между радиусами крепления обеих триад акселерометров составляют  $120^\circ$  [31–33]. На валу также расположены подвижная часть ДВ постоянного тока, диск УЭ с разрешающей способностью не хуже  $0,005$  угл. с и механизм отслеживания, обеспечивающий компенсацию вредных моментов, действующих по оси вращения подвижной части управляемого основания. Электронная часть стенда помимо управляющего процессорного модуля включает: преобразователь сигнала ИУС (ВОГ или ЛГ), переводящий его выходную информацию  $U_{\text{ИУС}}$  (в виде аналогового или дискретного сигнала) в код процессорного модуля  $u_\omega$ ; предварительные усилители сигналов от датчиков угла акселерометров, связанные с процессорным модулем через соответствующие АЦП; усилитель мощности для датчиков момента акселерометров (контуров измерений) и ДВ (контура стабилизации), на которые подаются управляющие воздействия от процессора через ЦАП; блок управления механизмом отслеживания, также связанный с процессорным модулем; преобразователи сигналов от ИП и УЭ, выходы которых соединены с управляющим компьютером и процессорным модулем через соответствующие ПВВ.

В обоих режимах (низкоскоростном и высокоскоростном) система работает следующим образом. С управляющего компьютера через ПВВ в процессор поступает (в виде цифрового кода) сигнал  $U_{\text{зад}}$ , соответствующий заданной угловой скорости вращения платформы  $\omega_\omega$ , который сравнивается с сигналом обратной связи  $U_{\text{о.с.}} = U_\omega + U_\varepsilon$ , имеющим две составляющие. Одна из них –  $U_\omega$  пропорциональна действительной скорости вращения  $\omega_\omega$ . В первом (низкоскоростном) режиме  $U_\omega$  формируется по сигналу от ИУС (ВОГ или ЛГ), а во втором – суммированием сигналов акселерометров  $1\zeta$ – $3\zeta$  (после извлечения квадратного корня [32, 33] в процессорном модуле), измеряющих центростремительное ускорение. Вторая составляющая  $U_\varepsilon$  пропорциональна угловому ускорению платформы, обеспечивает высокую стабильность заданного движения платформы и образуется суммированием сигналов акселерометров  $1\tau$ – $3\tau$ , измеряющих тангенциальное ускорение.

Отметим, что формирование  $U_\omega$  и  $U_\varepsilon$  осуществляется в регуляторе контура стабилизации, реализованном в процессоре. При этом первая составляющая вырабатывается как  $U_\omega = k_\omega \cdot u_\omega$ , где  $k_\omega$  выбирается так, чтобы обеспечить необходимый коэффициент преобразования стенда. Вторая составляющая образуется по суммарному сигналу  $u_\varepsilon$  акселерометров  $1\tau$ – $3\tau$  в виде  $U_\varepsilon = k_\varepsilon \cdot u_\varepsilon$ , где  $k_\varepsilon$  выбирается исходя из требований к качеству регулирования и высоким запасам устойчивости контура стабилизации.

В этом же регуляторе по разностному сигналу  $e = U_{\text{зад}} - U_{\text{о.с.}}$  формируется управляющее воздействие  $u_{\text{ст}}$ , которое поступает на усилитель мощности ДВ, задающего вращение платформы. При этом возникают гироскопические моменты, вызывающие отклонение маятников акселерометров, и с их датчиков угла снимаются напряжения ( $U_{\text{дв}}^\tau, U_{\text{дв}}^\zeta$ ), которые после предварительного усиления и преобразования в цифровую

форму (с помощью соответствующих АЦП) поступают в процессорный модуль. По этим сигналам регуляторами контуров акселерометров, также реализованными в процессорном модуле, вырабатываются сигналы  $u_r$ ,  $u_{ц}$ , которые через усилитель мощности и датчик момента компенсируют возникающие моменты отклонения маятников, обеспечивая тем самым работу акселерометров, и одновременно используются в алгоритме управления контура стабилизации.

Процессорный модуль обеспечивает также функционирование механизма отслеживания, компенсацию температурных погрешностей акселерометров и вычисление угловой скорости платформы, поступающей в управляющий компьютер, по сигналу  $U_{\text{УЭ}}$  от УЭ (через соответствующий преобразователь). По тому же каналу в управляющий компьютер поступает информация об угловой скорости платформы, полученной от измерителей (в первом режиме – от ВОГ или ЛГ, во втором – от триады акселерометров  $1ц$ ,  $2ц$ ,  $3ц$ ). От ИП информация об угловой скорости через преобразователь сигнала также попадает в управляющий компьютер, где обрабатываются полученные данные и формируется выходная информация, необходимая для аттестации прибора.

В приведенной схеме широкодиапазонного стенда (его конструкция и работа подробно описаны в [21, 22]) используется механизм отслеживания для снижения моментов трения по оси подвеса стенда, без которого можно обойтись при наличии малогабаритных аэростатических опор. В этом случае конструктивное решение существенно упрощается, однако принципы построения ЦСУ остаются теми же.

### Цифровая система управления. Методы синтеза цифровых регуляторов

Цифровая система управления стендами имеет ряд преимуществ по сравнению с аналоговой, что было отмечено в работах [31–33, 44, 45]. Применение ЛГ, ВОГ или ВТГ в качестве ИЧЭ существенно упрощает синтез цифрового регулятора стендов, поскольку эти гироскопы не имеют вращающихся частей и кинетического момента, наличие которого усложняет систему управления стендом, в чем можно убедиться на примере схем, рассмотренных в [31, 32]. Диапазон задания угловых скоростей стендами определяется верхним пределом измерения ИУС (в случае стенда на рис. 5, а также государственного первичного эталона на рис. 2 это относится лишь к режиму измерения без использования акселерометров).

Применение в качестве ИЧЭ прецизионного ВТГ, а также гироскопа на ЯМР, у которых диапазон измерения угловых скоростей составляет тысячи градусов в секунду при высоких значениях стабильности масштабного коэффициента и нулевого сигнала [3], имеет большой потенциал в будущем при создании эталонов, рассмотренных в [39]. Это связано с простотой синтезированных регуляторов и возможностью замены конструктивных реализаций стендов с ИЧЭ без изменения конструкции стенда при перепрограммировании управляющего процессора ЦСУ.

Приведем пример цифрового регулятора стенда, работающего в режиме самоконтроля (см. рис. 4), с ВОГ и ЛГ в качестве ИЧЭ. Подробно синтез регулятора рассмотрен в [33], а общие принципы, положенные в его основу, изложены в работах [46, 47, 49, 50–54].

Структурная схема поворотного стенда, составленная в соответствии с функционально-кинематической схемой (рис. 4), но без учета периферийных элементов, не входящих в контур управления, приведена на рис. 6. На схеме выделены основные функциональ-

ные элементы системы и с целью упрощения не показаны блоки преобразования сигнала в канале измерения (сигнал  $y$ ) и ЦАП в канале управления (сигнал  $u_{ст}$ ). Неизменяемая часть системы (объект управления) представлена разгрузочным устройством – двигателем с усилителем мощности, платформой и ИУС, в качестве которого используются ВОГ либо ЛГ.

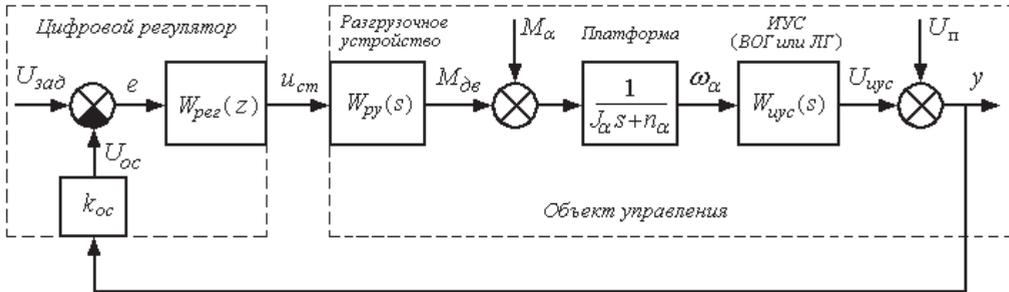


Рис. 6. Структурная схема стенда для контроля ИУС, находящегося в режиме самоконтроля

Разгрузочное устройство, состоящее из усилителя мощности и ДВ, создает на оси платформы управляющий момент  $M_{дв}$ , который обеспечивает (при наличии возмущающего момента  $M_{\alpha}$ ) ее разворот с угловой скоростью  $\omega_{\alpha}$ . Передаточная функция разгрузочного устройства принимается такой же, как в работах [31–33], и имеет вид:

$$W_{py}(s) = \frac{k_{py}(T_{py2}s + 1)}{(T_{py1}s + 1)(T_{py3}s + 1)}. \quad (1)$$

Информация от ИУС трансформируется (с помощью соответствующих преобразователей) в цифровой сигнал  $U_{иус}$ , к которому добавляется приведенная к этому сигналу помеха  $U_{п}$ . При этом если используется ВОГ, то передаточная функция ИУС совместно с преобразователями сигналов, преобразованная с учетом элементов сервисной электроники ВОГ [22, 33] и представленная в нормальной форме, имеет вид:

$$W_{иус}(s) = \frac{k_{вог}(T_{вог1}s + 1)}{T_{вог2}^2 s^2 + 2\xi_{вог} T_{вог2} s + 1}. \quad (2)$$

В другом варианте, когда в качестве ИУС используется ЛГ, передаточная функция  $W_{иус}(s)$  определяется усилителем информационного канала ЛГ и представляется колебательным звеном [33]:

$$W_{иус}(s) = \frac{k_{лг}}{T_{лг}^2 s^2 + 2\xi_{лг} T_{лг} s + 1}. \quad (3)$$

Параметры выделенных на схеме функциональных элементов (платформа, разгрузочное устройство, ИУС), образующих объект управления контуром стабилизации стенда, сведены в табл. 1.

Как показано в [33], если в случае применения в качестве ИЧЭ ВОГ либо ЛГ для реализации алгоритма управления в цифровой форме выбрать период дискретности  $h = 0,001$  с, то при частоте среза разомкнутого контура  $\omega_{ср} \approx 40$  рад/с нетрудно установить, что эта частота оказывается значительно левее (почти на две декады) частоты Найквиста [53]  $\omega_N = \pi/h$ .

Функциональный элемент		Параметр	Числовое значение, единица измерения
Платформа однорежимного стенда		$J_\alpha$	$0,85 \cdot 10^2 \text{ Г} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^2$
		$n_\alpha$	$0,4 \cdot 10^2 \text{ Г} \cdot \text{см} \cdot \text{с}$
ИУС	ВОГ	$k_{\text{ВОГ}}$	7,14 В·с/рад
		$T_{\text{ВОГ1}}$	$10^{-3} \text{ с}$
		$T_{\text{ВОГ2}}$	$0,357 \cdot 10^{-2} \text{ с}$
		$\xi_{\text{ВОГ}}$	0,6
	ЛГ	$k_{\text{ЛГ}}$	257,5 В·с/рад
		$T_{\text{ЛГ}}$	$1,52 \cdot 10^{-4} \text{ с}$
$\xi_{\text{ЛГ}}$		0,625	
Разгрузочное устройство (РУ)		$k_{\text{РУ}}$	$0,194 \cdot 10^3 \text{ Г} \cdot \text{см} / \text{В}$
		$T_{\text{РУ1}}$	$0,45 \cdot 10^{-3} \text{ с}$
		$T_{\text{РУ2}}$	$0,12 \cdot 10^{-2} \text{ с}$
		$T_{\text{РУ3}}$	$0,19 \cdot 10^{-3} \text{ с}$

Тогда передаточную функцию цифрового регулятора с учетом числовых значений параметров запишем как [33]

$$W_{\text{pec}}(z) = k_0 + \frac{k_1 h}{z-1} = k_1 \left( T_{\text{нл}} + \frac{h}{z-1} \right) = 1,06 + \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{z-1}. \quad (4)$$

Здесь  $T_{\text{нл}} = J_\alpha / n_\alpha = 2,125 \text{ с}$ , а  $k_0$  и  $k_1$  – некоторые коэффициенты, выбираемые исходя из устойчивости контура и хорошего качества регулирования. Следует заметить, что в силу указанного соотношения между частотой среза и частотой Найквиста присутствующее в контуре запаздывание по управлению на один такт, обусловленное наличием вычислителя, практически не будет сказываться на качестве регулирования, так что специальных мер по компенсации этого запаздывания не требуется.

ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы управления в этом случае будут иметь вид, как показано на рис. 7 и 8.

Для построения алгоритма вычисления управления  $u_{\text{ст}}(i)$  на текущем  $i$ -м такте дискретности запишем формальные операторные уравнения, соответствующие структурной схеме регулятора (рис. 6) и его найденной передаточной функции (4):

$$u_{\text{ст}}(i) = 1,06e(i) + 0,5\gamma(i), \quad \gamma(i) = \frac{10^{-3}q^{-1}}{1-q^{-1}}e(i), \quad e(i) = U_{\text{зад}}(i) - k_{\text{о.с.}}y(i), \quad (5)$$

где  $\gamma$  – вспомогательная переменная,  $q^{-1}$  – оператор обратного сдвига, необходимость использования которого вызвана тем, что в алгоритме вычисления управления  $u_{\text{ст}}(i)$  следует использовать переменные только текущего или предшествующих тактов, хранящиеся в оперативной памяти процессора. Тогда непосредственно из соотношений (5) данный алгоритм можно записать в виде следующих разностных уравнений:

$$e(i) = U_{\text{зад}}(i) - k_{\text{о.с.}} y(i), \quad \gamma(i) = \gamma(i-1) + 10^{-3} e(i-1), \quad u_{\text{ст}}(i) = 1,06e(i) + 0,5\gamma(i),$$

где  $k_{\text{о.с.}}$  принимает значения 3,21 или 0,089 соответственно для ВОГ или ЛГ.

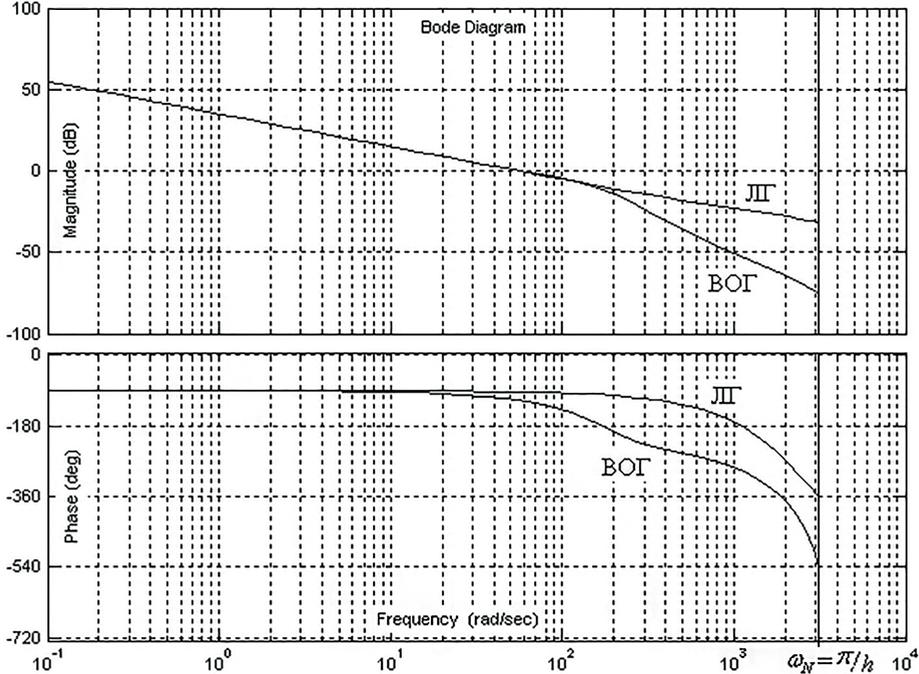


Рис. 7. ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы управления стандом

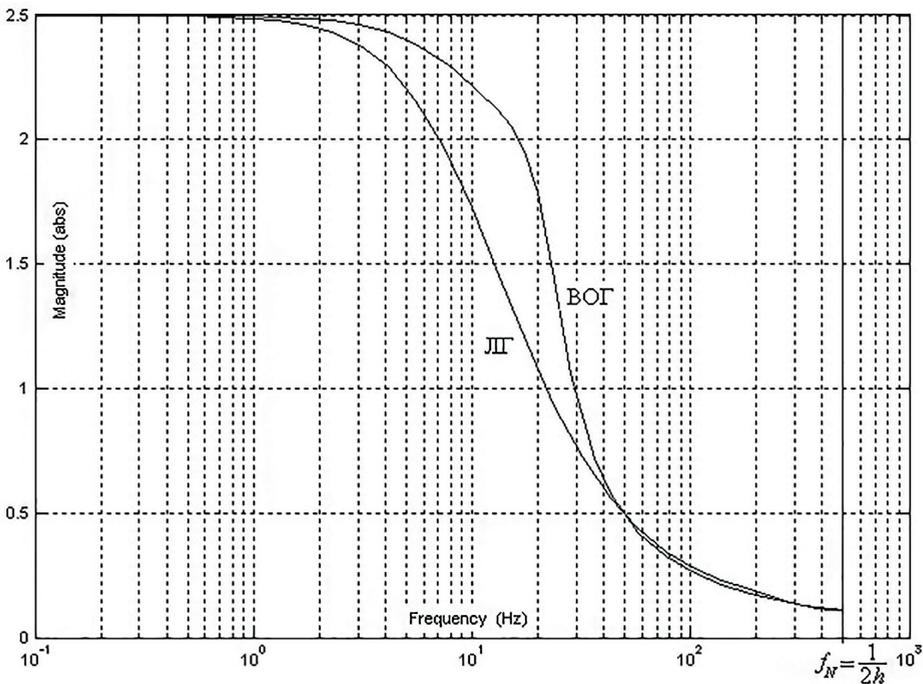


Рис. 8. АЧХ замкнутой системы от задающего воздействия к угловой скорости платформы станда

Очевидно, что для реализации этого алгоритма необходимо использовать информацию о текущем измерении  $y(i)$ , а также значения переменных  $\gamma(i-1)$  и  $e(i-1)$  из предыдущего такта, хранимые в оперативной памяти процессора. Причем для начального момента ( $i = 0$ ) необходимо задать начальные значения  $\gamma(-1)$  и  $e(-1)$ , которые могут быть приняты нулевыми. Графики переходных процессов показаны на рис. 9.

Из приведенных на рис. 7 и 8 графиков видно, что при применении оптических гироскопов без вращающихся частей, не обладающих кинетическим моментом, при одном и том же цифровом регуляторе только за счет подбора коэффициентов регулирования  $k_0$  и  $k_1$  в выражении (4) получаем динамические характеристики со следующими показателями качества: частота среза разомкнутого контура составляет  $\approx 57$  рад/с для обоих вариантов; запасы устойчивости по модулю и фазе определились как  $\approx 11$  дБ и  $\approx 65^\circ$  для ВОГ и  $\approx 23$  дБ и  $\approx 86^\circ$  для ЛГ. Полученные частотные показатели качества характеризуют данную цифровую систему управления как обладающую высокими робастными свойствами. Полоса пропускания стенда – 10 Гц.

Из рис. 9 следует, что время регулирования составляет  $\approx 0,1$  с, перерегулирование по основной переменной  $\omega_\alpha(t)$  в обоих вариантах (ВОГ или ЛГ) практически отсутствует.

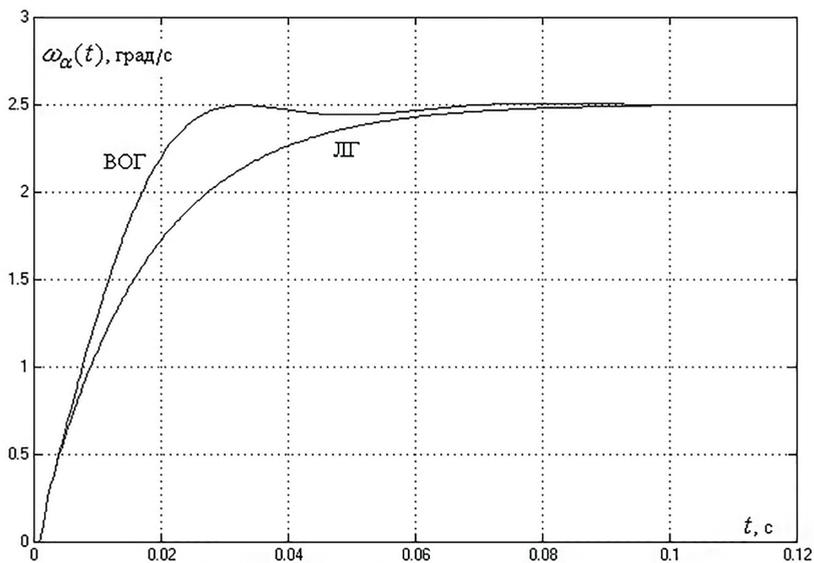


Рис. 9. Переходные процессы по угловой скорости стенда для ИЧЭ ВОГ и ЛГ

Задействие более сложных регуляторов и акселерометров в контуре управления совместно с измерителями угловой скорости [31–33] приводит к усложнению законов цифрового управления. Вместе с тем, если в качестве ИЧЭ используются гироскопы, основанные на новых физических принципах (в приведенных примерах – ВОГ и ЛГ), а не с кинетическим моментом, законы управления упрощаются даже в схемах, аналогичных представленной на рис. 5 [31–33].

Как показали проведенные авторами исследования методов синтеза цифрового регулятора кварцевого маятникового акселерометра [16, 17, 34], применение любого из них [46, 47, 49, 50–54] дает примерно одинаковые результаты – позволяет обеспечить высокое качество работы системы автоматического управления и ее робастные свойства. Учитывая большую постоянную времени платформы стенда в сравнении

с постоянными времени ИЧЭ, каждый из которых является компенсационной системой автоматического регулирования с достаточно высокими робастными свойствами, методы синтеза регуляторов вряд ли будут влиять на робастные свойства стендов, применяемых согласно [39] в качестве любого типа эталонов.

### **Инерциальные чувствительные элементы стендов – измерители угловой скорости и линейного ускорения**

В современных прецизионных стендах, разрабатываемых в рамках предлагаемой концепции, основную роль в обеспечении их точности играют ИЧЭ, включенные в состав ЦСУ. Именно они обеспечивают измерение мгновенной угловой скорости стендов и позволяют достичь высоких точностных характеристик разрабатываемых сложных мехатронных систем, каковыми и являются эти стенды. Как уже отмечалось выше, наиболее перспективные ИЧЭ на настоящий момент – прецизионные ВОГ, ЛГ и ВТГ, которые обладают высокими точностными характеристиками в части погрешности масштабного коэффициента и нулевого сигнала и достаточно широким диапазоном измерения угловых скоростей. В связи с этим они могут применяться в качестве ИУС<sub>1</sub> и ИУС<sub>2</sub>, показанных на рис. 2. Конкретный тип устройства зависит от разработчика стендов и ТЗ заказчика. В перспективе для дальнейшего совершенствования технических характеристик ИУС в качестве ИЧЭ прецизионных стендов могут быть использованы ЯМГ и гироскопы на волнах материи.

Выбор того или иного измерителя угловой скорости в качестве инерциального чувствительного элемента поворотного стенда должен осуществляться в первую очередь на основе сравнения основных точностных характеристик: ННС, НМК и минимального шума (ARW). Именно эти параметры ВОГ, ЛГ и ВТГ выгодно отличают их от остальных типов современных приборов [3]. Современные прецизионные ВОГ обладают ННС от 0,0001 °/ч до 0,005 °/ч, НМК – от 0,0002% до 0,01%, ARW – от 0,0002 °/√ч до 0,0007 °/√ч при динамическом диапазоне от 100 °/с до 600 °/с [5–7].

Параметры прецизионных ВТГ следующие: ННС – от 0,00008 °/ч до 0,001 °/ч, НМК – от 0,0001% до 0,005%, ARW – от 0,0002 °/√ч до 0,001 °/√ч, динамический диапазон измерений в режиме интегрирующего гироскопа неограничен, может колебаться от 500 до 5000 °/с [8–13].

Современные ЛГ также имеют достаточно высокие точностные характеристики, чтобы их можно было использовать в качестве ИЧЭ прецизионных стендов: ННС – от 0,005 °/ч до 0,01 °/ч, НМК – от 0,0001% до 0,001%, ARW – от 0,001 °/√ч до 0,003 °/√ч при динамическом диапазоне от 100 °/с до 800 °/с [3, 4].

Таким образом, ВТГ, ЛГ и ВОГ вполне применимы для создания прецизионных поворотных стендов с ИЧЭ как государственного первичного эталона задания и хранения угловой скорости, так и иерархически подчиненных ему эталонов.

Измерители линейных ускорений различного класса и принципа действия, обозначенные на рис. 2 как ИЛУ<sub>т</sub><sup>н</sup>, ИЛУ<sub>ц</sub><sup>н</sup>, такие как кремниевые, поплавковые, кварцевые и струнные маятниковые акселерометры, также могут применяться в прецизионных стендах с ИЧЭ. Например, в состав современных БИНС (как отечественных, так и зарубежных) часто входят кварцевые маятниковые акселерометры (КМА) [3].

В последнее время появились КМА с цифровой обратной связью [29, 30, 34] разработки ПО «Корпус» (г. Саратов), которые обладают следующими характеристиками:

динамический диапазон измерения – до 50 g, ННС –  $0,5 \cdot 10^{-5}$  g, НМК – 0,02–0,01%, порог чувствительности –  $0,5 \cdot 10^{-6}$  g, минимальное значение измеряемого ускорения –  $0,5 \cdot 10^{-4}$  g. Этот прибор позволяет, как следует из расчетов, приведенных в [21, 22], обеспечить измерение стендом угловой скорости при использовании ИЛУ<sub>τ</sub><sup>n</sup> в качестве ИЧЭ в нижнем диапазоне до  $0,6 \cdot 10^{-4}$  °/с. А если использовать его в качестве ИЛУ<sub>ц</sub><sup>n</sup> (рис. 2), диапазон измерения расширяется до 4000 °/с [35], т.е. становится на порядок больше, чем у рассмотренных ранее гироскопических устройств.

Таким образом, применение акселерометров в качестве ИЧЭ не только улучшает точностные характеристики поворотных стендов, но и повышает качество их системы автоматического управления за счет введения первой производной от измеряемой угловой скорости в контур управления стендом от КМА и расширяет диапазон измеряемой угловой скорости.

### **Прецизионные датчики угла, приводные двигатели, токоподводы и аэростатические опоры стендов**

На сегодняшний момент лидером по созданию УЭ – высокоточных датчиков угла является английская фирма Renishaw [42]. Как правило, в их состав входят оптическое кольцо с нулевой меткой и считывающие головки, которые крепятся на неподвижной части объекта управления. УЭ работают на скоростях до 36000 об./мин  $\approx 2 \cdot 10^5$  °/с и определяют угол с погрешностью до  $0,38'' \approx 10^{-4}$ °, что позволяет применять их в поворотных стендах для определения приращения угла поворота платформы с высокой точностью.

В качестве ДВ в стендах, как правило, используются двигатели постоянного тока (ДПТ) [55, 56]. При вращении платформы стенда, а именно вала оси вращения с закрепленными на нем элементами, разгрузочный момент двигателя должен компенсировать момент сопротивления вращению. К достоинствам ДПТ [56] относятся простота конструкции и управления, практически линейные механическая и регулировочная характеристики, легкая регулировка частоты вращения, хорошие пусковые свойства (большой пусковой момент). За рубежом ДПТ в настоящее время выпускают фирмы АВВ, Siemens, Sew Eurodrive [57, 58] и др. Лучшие образцы среди отечественных производителей – это двигатели серий 2ПБВ, 4ПБМ, 4ПНМ, 4ПФ, ДПМ, П, ПБ (Орский завод электромонтажных изделий [59]); двигатели серий МР, МТ (заводы «Динамик», «Вида», «Энергия», «Подем», ЗИТА, «Складская техника», «ЕлМот», «Динамо», «Ел-Пром» [60]). В настоящее время для создания прецизионных поворотных стендов можно подобрать любой высокоточный маломощный электродвигатель постоянного тока с максимальным развиваемым моментом не менее 400 гсм (0,04 Н·м) [22].

В ранее разработанных ПО «Корпус» стендах с ИЧЭ (см. рис. 10 и 11) в качестве приводных применялись ДПТ типа «датчик положения – двигатель бесконтактный» (ДП–ДБ). Двигатель представляет собой синусно-косинусный вращающийся трансформатор, в котором возможна неидентичность каналов, связанная с различием коэффициентов их передачи. Данный эффект возникает из-за дрейфа операционных усилителей, неидентичности номиналов RC-элементов и наличия нулевых сигналов в синусном и косинусном каналах. Способ повышения стабильности вращения стенда при неидентичности каналов разгрузочного устройства на основе ДПТ и его системы управления путем калибровки этого двигателя подробно рассмотрен в работе [61]. Стенды

имели аналоговую систему управления как ИЧЭ, так и ДВ, в качестве измерителя угла поворота платформы применялся фотоэлектрический датчик угла, а в качестве ИЧЭ – поплавковый датчик угловой скорости средней точности (рис. 10) и КМА (рис. 11). Эти стенды можно классифицировать как эталоны, иерархически подчиненные государственному первичному эталону задания и хранения угловой скорости. Их технические характеристики приведены в [22].



Рис. 10. Стенд с датчиком угловой скорости в режиме самоконтроля



Рис. 11. Стенд с датчиком угловой скорости и КМА в качестве ИЧЭ

В случае применения ЦСУ в современных мехатронных системах в качестве системы управления двигателем можно использовать принцип широтно-импульсного управления, также широко применяемого в настоящее время, например в системах разработки ВНИИМ им. Д.И. Менделеева (Санкт-Петербург) [30, 34].

Конструкции токоподводов и аэростатических опор достаточно хорошо известны и широко применяются в современных прецизионных стендах различных фирм. В государственном первичном эталоне задания и хранения угловой скорости необходимо использовать такие технические решения, которые обеспечивают минимальное трение по оси вращения стенда. Для иерархически подчиненных ему эталонов подходят малогабаритные аэростатические опоры либо разгрузочные устройства, описанные в [21, 22]. В любом случае, предлагаемые в настоящей статье подходы к созданию прецизионных поворотных стендов должны способствовать улучшению технических характеристик разрабатываемых мехатронных систем даже при появлении новых конструкторско-технологических решений.

### **Сравнение характеристик существующего государственного первичного эталона задания и хранения угловой скорости ГЭТ 108–2019 с теоретически возможными характеристиками предлагаемых мехатронных систем с ИЧЭ**

Существующий в настоящее время государственный первичный эталон задания и хранения угловой скорости ГЭТ 108–2019 [62] был разработан в 1977 г. и модер-

низирован к 2019 г. в части сервисной электроники и современной компьютерной техники при съеме и обработке информации. В его состав входят три установки:

- 1) для воспроизведения малых угловых скоростей в диапазоне от  $5 \cdot 10^{-8}$  до  $2,5 \cdot 10^{-4}$  рад/с или  $2,865 \cdot 10^{-6}$  до  $1,43 \cdot 10^{-2}$  °/с, что соответствует от 0,01 до 51,5 °/ч;
- 2) низкоскоростная, воспроизводящая единицу угловой скорости (частоты вращения) в диапазоне 0,01–15 рад/с, что соответствует от 0,573 до 900 °/с;
- 3) высокоскоростная, воспроизводящая единицу угловой скорости в диапазоне 10–60000 рад/с.

В ходе модернизации был применен ВОГ средней точности фирмы «Оптолинк» для измерения нижнего диапазона угловых скоростей, по параметру ННС практически соответствующий эталону и не включенный в обратную связь установки. Таким образом, принцип формирования поверочной схемы эталона ГЭТ 108–2019 существенно отличается от предлагаемой. В случае модернизации ГЭТ 108–2019 или разработки нового эталона высокоскоростную установку можно оставить в его составе. Это объясняется тем, что прецизионные измерители угловой скорости не работают в высоких диапазонах измерения до 60000 рад/с. Две же первые установки вполне можно заменить схемой, реализованной по предложенному принципу (рис. 2). Такое техническое решение обладает следующими преимуществами:

- 1) сокращается число установок в эталоне;
- 2) повышается точность задания и измерения угловой скорости за счет рассмотренных выше факторов, а именно: высокоточных ИУС и ИЛУ, включенных в обратную связь системы управления двигателем установки, многоконтурной обратной связи и использования первичных измерителей различной физической природы, осуществляющих управление по угловой скорости, ее первой производной и интегралу, что также повышает точностные характеристики системы автоматического управления стендом [47, 49];
- 3) появляется возможность использования в ЦСУ как ранее разработанных алгоритмов обработки информации, так новых;
- 4) реализуется возможность замены ИЧЭ на более точные (если таковые появятся) без существенной корректировки алгоритмов управления;
- 5) используются высокоточные двигатели и аэростатические опоры, как ранее разработанные, так и новые, поскольку они не влияют на систему автоматического управления стендом.

Таким образом, при модернизации эталона ГЭТ 108–2019, предполагающей замену двух установок на низком и среднем диапазонах задаваемых угловых скоростей на одну по функционально-кинематической схеме (рис. 2), можно достичь следующих преимуществ:

- 1) в случае сохранения нижнего диапазона задаваемых угловых скоростей 0,01 °/ч можно расширить верхний диапазон с 900 до 4000 °/с;
- 2) при применении высокоточного ИУС с малой величиной ННС в 0,0001 °/ч случайный дрейф гироскопа, включенного в обратную связь установки, будет значительно меньше нижнего предела задаваемой угловой скорости – составит 1% от него.

Об остальных преимуществах такого технического решения уже сказано выше.

## Заключение

Таким образом, предлагаемая концепция разработки и проектирования современных испытательных стендов для контроля прецизионных ИУС для БИНС состоит в следующем.

1. Прецизионные стенды должны представлять собой мехатронные системы, содержащие прецизионные ИУС и ИЛУ, высокоточные датчики угла и ДВ постоянно-го тока, иметь ЦСУ как отдельными ИЧЭ, так и всем стендом, причем информация от всех измерителей должна комплексироваться в управляющем процессоре.

2. Установка для воспроизведения угловых скоростей нижнего и среднего диапазона государственного первичного эталона должна содержать два прецизионных ИУС – с оптимальными характеристиками по НМК и по ННС. Это позволяет наилучшим образом откалибровать эталон перед началом работы. Кроме того, в состав эталона должны входить 2 группы ИЛУ, в каждой – по 3 измерителя тангенциального и центростремительного ускорения точек их крепления к платформе стенда. Информация от ИЧЭ комплексировается с данными УЭ. Цифровые регуляторы и алгоритмы обработки информации в управляющем процессоре обеспечат максимально возможную точность и необходимые показатели качества прецизионной мехатронной системы – эталона для поверки прецизионных ИУС для БИНС и аттестации иерархически подчиненных ему эталонов. Эталон обязательно должен быть оснащен аэростатическими опорами подвеса оси вращения платформы для снижения моментов трения и ртутными токоподводами. Таким образом, эталоны, разрабатываемые метрологическими институтами и организациями, должны обладать наиболее высокими точностными характеристиками.

3. Эталоны, иерархически подчиненные государственному первичному эталону, строятся по тому же принципу, но с учетом соотношения «качество–цена», поскольку их разработка – прерогатива приборостроительных предприятий, каждое из которых может изготавливать прецизионный стенд для контроля ИУС в соответствии со своими нуждами. В таком случае число ИЧЭ может быть ограничено одним прецизионным ИУС и меньшим количеством ИЛУ, а высокоточный датчик угла – заменен измерительной системой на датчиках Холла [21, 22]. Применение аэростатических опор и ртутных токоподводов при этом не является обязательным, можно использовать и иные технические решения [21, 22].

4. ЦСУ стендами позволяет, как это было показано в работах [31–38], практически устранить зависимость регуляторов от типа ИЧЭ и заменять их, например, на ИЧЭ на ЯМГ и гироскопы на волнах материи без вмешательства в конструкцию стендов. Кроме этого, благодаря ЦСУ существенно сокращается функциональная база сервисной электроники путем замены аналоговых регуляторов на цифровые в управляющем процессоре.

5. Данный подход к разработке стендов для контроля ИУС для БИНС позволит решить проблему создания высокоточных эталонов в условиях проводимой политики импортозамещения.

*Работа поддержана РНФ, грант № 22-29-00101.*

ЛИТЕРАТУРА

1. **Измайлов Е.А.** Современные тенденции развития технологий инерциальных чувствительных элементов и систем летательных аппаратов // Труды ФГУП «НПЦАП». 2010. №1. С. 27–35.
2. **Калихман Д.М., Депутатова Е.А. и др.** Перспективы развития БИНС на современных типах гироскопов и акселерометров в ракетно-космической технике // Сборник трудов VII Международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации» (УОПИ-2018). Саратов: СГТУ, 2019. С. 29–53.
3. **Ривкин Б.С.** Аналитический обзор состояния исследований и разработок в области навигации за рубежом. Вып. 1–4. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2017–2019.
4. **Лукьянов Д.П., Филатов Ю.В. и др.** 50 лет лазерному гироскопу // Фотоника. 2014. №1. С. 42–61.
5. **Патюрэль И., Онгас И. и др.** Бесплатформенная инерциальная навигационная система на основе ВОГ с уходом одна морская миля в месяц: мечта уже достижима? // Гироскопия и навигация. 2013. №3. С. 3–13.
6. **Технические характеристики** волоконно-оптического гироскопа FOG 24 фирмы Al Cielo inertial Solutions Ltd: [сайт]. URL: [www.alcielo.com](http://www.alcielo.com) (дата обращения: 06.12.2021).
7. **Технические характеристики** волоконно-оптического гироскопа ОИУС 1001 фирмы «Оптолинк»: [сайт]. URL: [www.optolink.ru/ru/products/single\\_axis\\_fog](http://www.optolink.ru/ru/products/single_axis_fog) (дата обращения: 06.12.2021).
8. **Жанруа А., Буве А., Ремиллье Ж.** Волновой твердотельный гироскоп и его применение в морском приборостроении // Гироскопия и навигация. 2013. № 4. С. 24–34.
9. **Негри С., Лабарр Э. и др.** Новое поколение инерциальных навигационных систем на основе ВТГ для аппаратов, обеспечивающих запуск спутников // Гироскопия и навигация. 2016. № 1. С. 49–59.
10. **Технические характеристики** волнового твердотельного гироскопа фирмы Safran: [сайт]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8577108> (дата обращения: 06.12.2021).
11. **Delhaye, F., Girault, J.-Ph.,** HRG Technological Breakthrough for Advanced Space Launcher Inertial Reference System, *Proceed. 25-th St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*, 2018, pp. 267–271.
12. **Schmidt, G.T.,** INS/GPS Technology Trends, Advances in Navigation Sensors and Integration Technology, *RTO Lecture*, 2004, no. 232, p. 11.
13. **Barbour, N.M.,** Inertial Navigation Sensors, Advances in Navigation Sensors and Integration Technology, *RTO Lecture*, 2004, no. 232, p. 17.
14. **Майер Д., Ларсен М.** Гироскоп на ядерном магнитном резонансе для инерциальной навигации // Гироскопия и навигация. 2014. № 1. С. 3–13.
15. **Пешехонов В.Г., Литманович Ю.А., Вершовский А.К.** Гироскоп на основе явления ядерного магнитного резонанса: прошлое, настоящее, будущее // Материалы 7 российской мультиконференции по проблемам управления. СПб.: ЦНИИ «Электрон», 2014. С. 35–42.
16. **Умарходжаев Р.М., Павлов Ю.В., Васильев А.Н.** История разработки гироскопа на основе ядерного магнитного резонанса в России в 1960–2000-е годы // Гироскопия и навигация. 2018. № 1. С. 3–27.
17. **Уокер Т.Дж., Ларсен М.С.** ЯМР-гироскопы со спин-обменной накачкой // Гироскопия и навигация. 2018. № 1. С. 28–54.
18. **Фара Т., Герлен К. и др.** Транспортируемый гравиметр на холодных атомах разработки LNE–SYRTE: работа в подземных условиях в режиме наилучшей чувствительности // Гироскопия и навигация. 2014. № 3. С. 3–15.
19. **Решетников В.И., Доронин В.П. и др.** Гироскопические чувствительные элементы для систем управления ориентацией и стабилизации орбитальных космических аппаратов // VIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ЦНИИ «Электрон», 2001. С. 17–30.
20. **Решетников В.И., Вольщев А.А. и др.** Опыт создания высокоточных поплавковых гироскопов, применяемых в системах угловой ориентации и стабилизации космических аппаратов и станций // X Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ЦНИИ «Электрон», 2003. С. 226–234.
21. **Калихман Д.М.** Основы проектирования управляемых оснований с инерциальными чувствительными элементами для контроля гироскопических приборов. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2001. 336 с.
22. **Калихман Д.М.** Прецизионные управляемые стенды для динамических испытаний гироскопических приборов / под общ. ред. акад. В.Г.Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электрон», 2008. 296 с.

23. Грязин Д.Г., Скалон А.И., Ковалев А.С., Лычев Д.И., Методика оценки метрологических характеристик одноосного стенда переменных угловых скоростей // Гироскопия и навигация. 2010. №1 (68). С. 81–90.
24. Dranitsyna, E.V., IMU Calibration Using SINS Navigation Solution: Selection of the Rate Table Motion Scenario, *24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2017, pp. 79–95.
25. Path, U., Hundhausen, R., et al. Experimental Digital Squid with Integrated Feedback Circuit, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1997, vol. 7, no. 2, part 3, pp. 2747–2751.
26. Banerjee, T., Sarkar, B.C., Conventional and Extended Time-Delayed Feedback Controlled Zero-Crossing Digital Phase Locked Loop, *International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering*, 2012, vol 22, no. 12, pp. 12–30.
27. Havlicsek, H.S., Zana, L., Improving real-time communication between host and motion system in a HWIL simulation, *SPIE Defense and Security Symposium*, Acutronic, USA, Pittsburgh, 2004.
28. Tschirky, M., Kaegi, M., Zana, L., Inertial MEMS Testing New Challenges in Motion Simulation, *Symposium Gyro Technology*, 2009, Karlsruhe, Germany, 2009.
29. Калихман Д.М., Скоробогатов В.В. и др. Кварцевый маятниковый акселерометр с цифровой обратной связью как система автоматического управления: результаты синтеза регуляторов и программно-математического обеспечения. Перспективы дальнейшего развития // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2019. Вып. 26. С. 2–37.
30. Калихман Д.М., Депутатова Е.А. и др. Маятниковый акселерометр с цифровым управлением и новыми функциональными возможностями // Известия РАН. Теория и системы управления. 2021. №2. С. 73–95.
31. Калихман Д.М., Садомцев Ю.В. и др. Цифровая стабилизация движений прецизионных управляемых оснований с инерциальными чувствительными элементами. Часть 1. Применение поплавкового измерителя угловой скорости // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. №1. С. 120–132.
32. Калихман Д.М., Садомцев Ю.В. и др. Цифровая стабилизация движений прецизионных управляемых оснований с инерциальными чувствительными элементами. Часть 2. Применение поплавкового измерителя угловой скорости и маятниковых акселерометров // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. №2. С. 131–146.
33. Калихман Д.М., Садомцев Ю.В. и др. Прецизионные поворотные стенды нового поколения с инерциальными чувствительными элементами и цифровым управлением // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. №2. С. 130–146.
34. Калихман Д.М., Калихман Л.Я. и др. Опыт проектирования и изготовления блоков измерителей линейного ускорения на кварцевых маятниковых акселерометрах с аналоговой и цифровой системами управления. Саратов: СГТУ им. Ю.А. Гагарина, 2021. 240 с.
35. Калихман Д.М., Депутатова Е.А. и др. Пути расширения диапазона измерения и повышения точностных характеристик поворотных стендов с инерциальными чувствительными элементами для контроля гироскопических приборов // 25 Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 334–339.
36. Калихман Д.М., Депутатова Е.А. и др. Разработка цифровых регуляторов для систем управления гироскопическими приборами и метрологическими установками на их основе с применением современных методов синтеза с целью улучшения точностных и динамических характеристик // 26 Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2019. С. 274–278.
37. Калихман Д.М., Депутатова Е.А. и др. Применение метода максимального правдоподобия при комплексировании информации с первичных измерителей в прецизионном поворотном стенде с инерциальными чувствительными элементами и цифровой системой управления для улучшения его точностных характеристик // Материалы XXVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. С. 221–225.
38. Калихман Д.М., Янковский А.А. и др. Принципы построения стендов с инерциальными чувствительными элементами для высокоточного измерения угловых скоростей // Сборник аннотаций докладов международной научно-практической конференции «175 лет ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и Национальной системе обеспечения единства измерений». СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2017. С. 145–149.

39. ГОСТ Р 8.885–2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Основные положения.
40. **Технические характеристики** поворотных столов фирмы Acutronic: [сайт]. URL: www.acutronic.com (дата обращения: 13.09.2022).
41. **Технические характеристики** поворотных столов фирмы Ideal-Aerosmith: [сайт]. URL: www.ideal-aerosmith.com (дата обращения: 13.09.2022).
42. **Технические характеристики** угловых энкодеров фирмы Renishaw: [сайт]. URL: www.renishaw.ru/ru/enclosed-optical-encoders--425273 (дата обращения: 06.12.2021).
43. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 370 с.
44. **Патент 2494345 РФ.** Заявка № 2012101374, приоритет от 16.01.2012. Универсальный широкодиапазонный стенд для контроля измерителей угловой скорости / Калихман Д.М. [и др.] Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений РФ 27.09.2013. Б.И. 2013.
45. **Патент 2403538 РФ.** Приоритет от 22.05.2009. Универсальный стенд для контроля прецизионных гироскопических измерителей угловой скорости / Калихман Д.М. [и др.] Зарегистрирован в Государственном реестре патентов Российской Федерации 10 ноября 2010 г. Б.И. №31, 2010.
46. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 767 с.
47. **Куропаткин П.В.** Теория автоматического управления. М.: Высшая школа, 1973. 528 с.
48. **Калихман Д.М., Нахов С.Ф.** Одноосный широкодиапазонный вращающийся стенд с инерциальными чувствительными элементами // Гироскопия и навигация. 2001. №2. С. 79–89.
49. **Бесекерский В.А., Небылов А.В.** Робастные системы автоматического управления. М.: Наука, 1983. 240 с.
50. **Изерман Р.** Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984. 541 с.
51. **Куо Б.** Теория и проектирование цифровых систем управления / пер. с англ. М.: Машиностроение, 1986. 446 с.
52. **Садомцев Ю.В.** Конструирование систем управления с обратной связью по критериям точности и грубости. Саратов: СГТУ, 2003. 297 с.
53. **Теория автоматического управления** / Под ред. В.Б. Яковлева. М.: Высш. шк., 2003.
54. **Федоров С.М., Литвинов А.П.** Автоматические системы с цифровыми управляющими машинами. М.–Л.: Энергия, 1965. 320 с.
55. **Делекторский Б.А.** Проектирование гироскопических электродвигателей. М.: Машиностроение, 1968. 252 с.
56. **Дубенский А.А.** Бесконтактные двигатели постоянного тока. М.: Энергия, 1967. 144 с.
57. **Двигатель постоянного тока:** [сайт]. URL: www.electroprivod.com (дата обращения: 06.12.2021).
58. **Двигатель постоянного тока:** [сайт]. URL: www.siemens.com (дата обращения: 06.12.2021).
59. **Двигатель постоянного тока:** [сайт]. URL: www.ielectro.ru (дата обращения: 06.12.2021).
60. **Двигатель постоянного тока:** [сайт]. URL: www.dynamo.ru (дата обращения: 06.12.2021).
61. **Депутатова Е.А.** Способ повышения стабильности задаваемой угловой скорости в прецизионных стендах с инерциальными чувствительными элементами // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. 2010. №3 (13). С. 23–31.
62. **Технические характеристики** государственного первичного эталона ГЭТ 108–2019.

---

**Kalikhman, D.M., Deputatova, E.A., Pchelintseva, S.V., and Gorbachev, V.O.** (Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia)  
Design Philosophy for a Class of Precision Rate Tables with Inertial Sensors in the Feedback Loop, *Гироскопия и Навигация*, 2022, vol. 30, no. 3 (118), pp. 41–64.

**Abstract.** The paper considers a concept for designing the precision gyroscopic rate tables with digital control systems and inertial sensors as modern mechatronic control systems.

Based on these systems, calibration algorithms for state primary standards of angular velocities can be elaborated. The designs of subordinate standards also containing inertial sensors and digital control systems can be developed based on the designs of the primary standards. These designs include the solutions earlier proposed by the authors and the new ones developed using the proposed algorithms.

**Key words:** state primary standard, mechatronic system, digital control system, angular rate sensor, accelerometer, precision rate table, standard.

Материал поступил 19.05.2022