

На правах рукописи

УДК 629.7.05

Цинь Цзыхао

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ  
«ГИРОСКОП – ПОВОРОТНЫЙ СТЕНД» ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ  
КАЛИБРОВКИ ДИНАМИЧЕСКИ НАСТРАИВАЕМЫХ ГИРОСКОПОВ**

Специальность: 05.11.03-Приборы навигации

Автореферат

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

秦子浩

Москва 2018 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Подчезерцев Виктор Павлович**  
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Панкратов Владимир Михайлович**  
доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией анализа и синтеза возмущенных динамических систем в прецизионной механике ФГБУН Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук, г. Саратов

**Меркурьев Игорь Владимирович**  
доктор технических наук, заведующий кафедрой робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва  
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва

Ведущая организация:

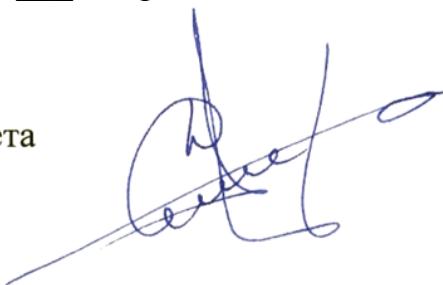
Защита диссертации состоится «16» мая 2018 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.141.19 по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, МГТУ имени Н.Э. Баумана, НИИ РЛ.

Автореферат разослан «\_\_\_» марта 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.ф.-м.н.



Д.А. Семеренко

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы диссертации.

Широкое применение в настоящее время бесплатформенных инерциальных навигационных систем в системах управления движением космических, авиационных, морских объектов, инклинометрии и контроля состояния нефте- и газопроводов, стало возможным благодаря бурному развитию микропроцессорной техники используемой в бортовых цифровых вычислительных машинах для решения кинематических уравнений и аналитического построения инерциальной системы координат, а также возросшим точностным характеристикам гироскопических датчиков угловых скоростей, используемых в системах ориентации. Особенностью применения датчиков угловых скоростей (ДУС) в движущихся объектах в качестве чувствительных элементов является необходимость обеспечения ими высоких точностных характеристик, в особенности, масштабных коэффициентов во всех условиях эксплуатации.

Измерение коэффициента преобразования ДУС осуществляется путем задания угловой скорости вращения платформы специального испытательного стенда, на которую закрепляют ДУС, и измерения его показаний. Очевидно, что от точности и стабильности во времени угловой скорости вращения платформы испытательного стенда зависит точность калибровки ДУС. В мировой практике разработки стендов для задания угловых скоростей, они, как правило, представляют собой механические системы, содержащие массивный корпус, в котором размещена вращающаяся на валу платформа с большим моментом инерции, необходимым для обеспечения стабильности угловой скорости вращения платформы. Это характерно для конструкций большинства испытательных стендов угловых скоростей - от первых типов стендов с шарикоподшипниковым подвесом оси вращения платформы и редукторной передачей вращения от приводного двигателя к платформе, до самых современных стендов с аэростатическим подвесом оси вращения платформы, с использованием бесподшипниковых и бесщеточных двигателей, ртутных токосъемных устройств, бесконтактных измерительных средств, а также с использованием методов сверхточной балансировки вращающейся платформы и стабилизацией возмущающих моментов и т.д. В последнее время появился класс стендов нового поколения, где высокая точность и стабильность задаваемой угловой скорости обеспечиваются высокоточной системой управления двигателем, причем в качестве измерительного средства используется лазерный гониометр.

В числе производителей современных поворотных стендов среди российских компаний можно отметить такие, как, «Корпус», «ИНЕРТЕХ» и «Азимут», а среди зарубежных – «Actidyn systemes» (Франция), «IdealAerosmith» (США) и «Acutronic» (Швейцария). Все современные прецизионные поворотные стены представляют собой сложные контрольно-испытательные системы обеспечивающие задание угловых скоростей в диапазоне (0.01–10000) °/с, при нестабильности (0.001–0,003) °/с и высокую точность позиционирования (около 2 угл.сек.). Поэтому эти стены имеют достаточно большие габариты и грузоподъемность, необходимые для испытаний широкой номенклатуры изделий, высокую стоимость, что далеко не всегда соответствует габаритам калибруе-

мых динамически настраиваемых гироскопов (ДНГ), а также финансовым и территориальным возможностям небольших предприятий, научно-исследовательских и университетских лабораторий.

В связи с этим, достаточно актуальной задачей является анализ возможности построения альтернативных вариантов испытательных стендов, не уступающих по возможностям обеспечения прецизионной калибровки гироскопов указанным выше стендам, но имеющих существенно меньшие массогабаритные характеристики, стоимость и доступные для большого круга потребителей.

**Целью диссертационной работы** является исследование алгоритмов комплексной системы «гироскоп – поворотный стенд» пред назначенной для прецизионной калибровки динамически настраиваемых гироскопов, особенностью которой является использование калибруемого гироскопа в качестве чувствительного элемента следящей системы.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Составить уравнения движения комплексной системы «гироскоп – поворотный стенд», учитывающие особенности динамики гироскопа и стендса;

2. Разработать вариант построения алгоритма и сервисной аппаратуры поворотного стендса, позволяющие с высокой точностью измерять параметры движения элементов системы прецизионной калибровки ДНГ;

3. Создать математическую модель прецессионного движения ротора ДНГ для анализа точностных характеристик предложенного метода в установленном режиме совместной работы основных частей комплекса: гироскопа и следящей системы испытательного поворотного стендса;

4. Согласовать параметры контуров обратной связи сервосистемы стендса и ДНГ в режиме датчика угловой скорости по результатам моделирования движения системы «гироскоп – поворотный стенд» в среде *Simulink (Matlab)*;

5. Разработать алгоритм калибровки ДНГ с учетом его математической модели погрешности и динамических характеристик гироскопа и стендса;

6. Разработать 3-D модель конструкции для анализа кинематики и упругомассовых характеристик необходимых при формировании параметров следящей системы;

7. Создать программное обеспечение на языке *C* для интерактивного взаимодействия оператора с испытательным стендом в процессе калибровки, индикации на экране монитора состояния всех элементов стендса и результатов измерения в реальном времени и обеспечения автоматизированного режима работы комплекса;

8. Разработать схемы электронных модулей обеспечивающих функционирование гироскопа, системы контроля положения платформы поворотного стендса, управления двигателем следящей системы, считывания данных с измерительных каналов гироскопа и сопряжения с ПЭВМ;

9. Провести экспериментальные исследования работоспособности разработанного испытательного стендса и предложенного алгоритма его работы, сравнить с результатами моделирования и теоретического анализа и выработать

рекомендации для дальнейшего совершенствования данного метода калибровки.

**Объектом исследования** является одноосный поворотный стенд с установленным на нем ДНГ типа ГВК-6, а также разработанные алгоритмы прецизионной калибровки и обработки информации получаемой с измерительных каналов гироскопа и стендса.

**Предметом исследования** является анализ достижимой точности калибровки масштабных коэффициентов ДНГ по предложенной методике, на одностенде вращения, работающего в режиме следящей системы, в которой чувствительным элементом является испытываемый гироскоп.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач применялись методы теории гироскопических систем, автоматического регулирования, электротехники и электроники, методы программирования на языке *C* и компьютерного моделирования в программных средах *SolidWorks*, *Simulink* (*Matlab*), *Mathcad*. Применялись также методы экспериментальных исследований на собранном и отлаженном одноосном поворотном стенде в режиме слежения, с ДНГ типа ГВК-6, с использованием специально разработанных и изготовленных для исследований электронных модулей, а также универсальной контрольно-измерительной техникой.

**Научная новизна** результатов диссертационной работы:

1. Разработан вариант схемотехнического решения, построения алгоритма и сервисной аппаратуры поворотного стендса, позволяющий с высокой точностью (до 0.001%) определять масштабные коэффициенты динамически настраиваемых гироскопов;

2. Приведена оценка влияния собственной скорости вращения Земли, дрейфа гироскопа и технологической неточности выставки датчиков момента гироскопа относительно корпуса на точностные характеристики разработанного алгоритма калибровки и даны рекомендации по снижению влияния этих факторов на точность калибровки.

**Практическая значимость работы.**

1. Проведенное теоретическое исследование и моделирование позволяет определить основные принципы построения стендса для прецизионной калибровки гироскопических датчиков угловой скорости на основе поворотного стендса, работающего совместно с калибруемым гироскопом в режиме следящей системы.

2. Предложенное и промоделированное в среде *SolidWorks* конструктивное исполнение испытательного поворотного стендса, измерительная аппаратура и алгоритм калибровки прецизионных динамически настраиваемых гироскопов позволяют обеспечить определение их масштабных коэффициентов с точностью 0.001%.

3. Разработано программное обеспечение позволяющее считывать и преобразовывать с помощью АЦП данные с измерительных каналов гироскопа и, затем, через модуль сопряжения передавать их на компьютер, графически визуализировать процесс калибровки на дисплее компьютера в реальном времени, а также производить их запись в базу данных на жестком диске.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается соответстви-

ем теоретических результатов, в том числе полученных математическим моделированием в пакете *Simulink (Matlab)*, с результатами экспериментальных исследований образца одноосного поворотного стенда с установленным на нем ДНГ типа ГВК-6, проведенных на кафедре приборов и систем ориентации, стабилизации и навигации МГТУ имени Н.Э. Баумана по разработанной методике.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Проведенное теоретическое исследование и численное моделирование в среде *Simulink (Matlab)* системы «гироскоп – поворотный стенд» позволило определить основные принципы построения испытательного комплекса для прецизионной калибровки динамически настраиваемого гироскопа;

2. По результатам анализа необходимых условий обеспечения высокой точности предложенного алгоритма калибровки динамически настраиваемых гироскопов предложены методы их достижения;

3. Экспериментальные исследования калибровки гироскопа ГВК-6 подтвердили основные теоретические выводы и результаты моделирования, и показали возможности разработанного алгоритма в обеспечении точности калибровки до 0.001%.

**Личный вклад автора** состоит в теоретико-расчётном моделировании движения системы «гироскоп – поворотный стенд». Автором лично разработано программное обеспечение для проведения лабораторных испытаний гироскопов, как в тестовом режиме (необходимом при подготовке специалистов), так и при реальной калибровке гироскопов. Автор проводил экспериментальные исследования процесса калибровки ДНГ на поворотном стенде, работающем в режиме следящей системы, анализировал полученные результаты. Для обеспечения высоких точностных характеристик разработанного алгоритма калибровки гироскопов предложены, промоделированы, изготовлены и отложены конструктивные элементы и электронные модули комплекса «гироскоп – поворотный стенд».

**Реализация и внедрение результатов.** Полученные в диссертационной работе результаты рекомендованы для использования в учебном процессе на кафедре приборов и систем ориентации, стабилизации и навигации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет) при проведении лабораторных работ и лекционных занятий со студентами по курсу «Теория гироскопов и гиростабилизаторов».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XXXVIII, XXXIV, XL, XLI Академических чтениях по космонавтике (Москва, 2014г, 2015г, 2016г, 2017г), на молодежных конференциях «Студенческая научная весна» (Москва, 2014г, 2015г, 2016г).

**Публикации.** Основные результаты диссертации изложены в 8 печатных работах, в том числе в 3 статьях в журналах, входящих в перечень рецензируемых журналов ВАК РФ, общим объемом 2,52 п. л.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырех

глав, общих выводов и заключения. Работа изложена на 105 страницах машинописного текста и содержит 56 рисунков, 16 таблиц и список литературы из 67 наименований.

### Основное содержание работы

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, представлены объект и предмет исследования, определяется цель работы и формулируются научные задачи исследования, направления её решения, раскрываются методы исследования, обозначены научная новизна и практическая ценность диссертации, обосновывается достоверность результатов, приводятся сведения о реализации и внедрении результатов работы, их апробации и публикации.

**В первой главе** диссертации представлены особенности работы комплексной системы «гироскоп – поворотный стенд», функционально-кинематическая схема которой показана на Рис.1.

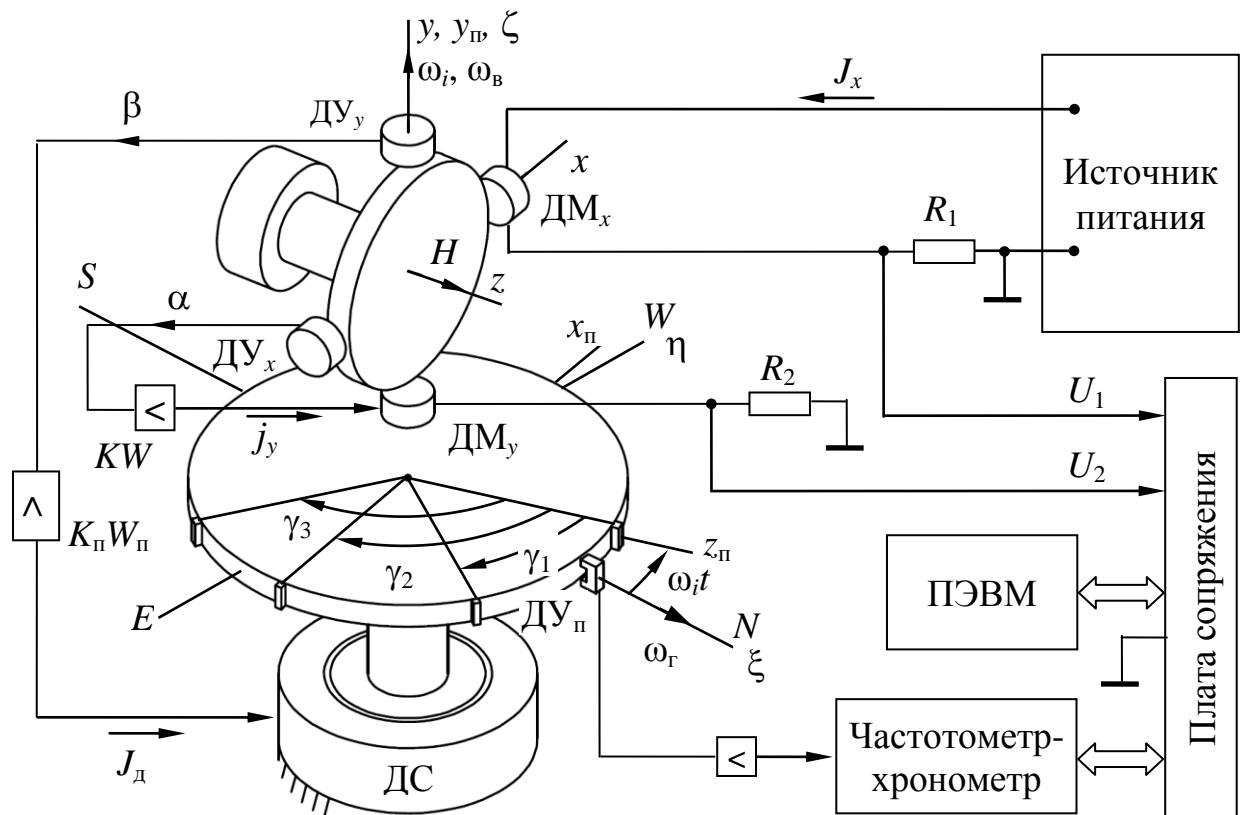


Рис.1. Функционально-кинематическая схема системы  
«гироскоп – поворотный стенд»

где,  $x_{uz}$ ,  $x_{\eta}u_{\eta}z_{\eta}$ ,  $\xi\eta\zeta$  – системы координат связанные с корпусом гироскопа, платформой стендса и географической системой координат;  $\alpha$  и  $\beta$  – углы поворота ротора гироскопа вокруг осей  $x$  и  $y$  относительно его корпуса;  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  и  $\gamma_3$  – углы поворота платформы;  $\omega_v$  и  $\omega_r$  – вертикальная и горизонтальная составляющие угловой скорости вращения Земли;  $\omega_i$  – угловая скорость вращения стендса;  $KW$  и  $K_{\eta}W_{\eta}$  – передаточные функции контура обратной связи гироскопа и поворотного стендса;  $J_d$ ,  $J_x$  и  $j_y$  – соответственно: ток в двигателе следящей системы, ток управления в моментном датчике  $\Delta M_x$  гироскопа и ток в моментном датчике  $\Delta M_y$  контура электрической пружины гироскопа;  $\Delta U_p$  – датчики угла поворота платформы;  $\Delta U_x$ ,  $\Delta U_y$  – датчики угла гироскопа по оси  $x$  и  $y$ ;  $\Delta C$

– двигатель следящей системы;  $R_i$  и  $U_i$  ( $i=1, 2$ ) – измерительные сопротивления и выходные напряжения.

Составим уравнения движения системы «гироскоп – поворотный стенд», воспользовавшись уравнениями Эйлера для каждого элемента этой системы – гироскопа и одноосной платформы:

$$\begin{cases} A(\ddot{\alpha} + \dot{\omega}_x) + H(\dot{\beta} + \omega_y) = M_x + M_{mx} \\ A(\ddot{\beta} + \dot{\omega}_y) - H(\dot{\alpha} + \omega_x) = M_y + M_{my}, \\ C_{\pi}\dot{\omega}_i + D_{\pi}\omega_i = M_{\pi} + M_c \end{cases} \quad (1)$$

где,  $A$  – экваториальный момент инерции ротора ДНГ,  $H$  – кинетический момент ротора ДНГ;  $\omega_x, \omega_y$  – компоненты абсолютной угловой скорости движения корпуса;  $M_c, M_{\pi}$  – моменты сопротивления вращению и обратной связи стендса;  $C_{\pi}$  – момент инерции платформы вокруг оси вращения;  $D_{\pi}$  – коэффициент демпфирования стендса вокруг его оси вращения;  $M_x, M_y$  – возмущающие моменты, приложенные к ротору ДНГ;  $M_{mx}, M_{my}$  – моменты, вызываемые токами  $J_x$  и  $J_y$  в катушках датчиков моментов.

Первые два уравнения системы (1) представляют уравнения движения ротора гироскопа, а третье – уравнение движения платформы вокруг ее оси вращения.

Также в первой главе даны линейные уравнения движения динамически настраиваемого гироскопа, учитывающие угловые и поступательные движения основания в условиях эксплуатации. На основе полученных уравнений движения гироскопа создана математическая модель прецессионного движения ротора ДНГ по конструктивным и технологическим признакам, и дается численная оценка влияния каждого из рассмотренных факторов на эксплуатационные характеристики гироскопа; проанализирована методика определения параметров динамически настраиваемых гироскопов, в том числе, масштабных коэффициентов ДМ ДНГ.

В реальных конструкциях ДНГ, из-за технологических отклонений в геометрии и установке обмоток датчиков момента в корпус, величины масштабных коэффициентов по осям  $x$  и  $y$  отличаются друг от друга и, кроме того, имеется взаимовлияние каналов управления. Скорость управления в этом случае определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \omega_x &= K_x J_x + K_{xy} J_y \\ \omega_y &= K_{yx} J_x + K_y J_y, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $K_x, K_y$  и  $K_{xy}, K_{yx}$  – основные и перекрестные масштабные коэффициенты ДМ по скорости управления.

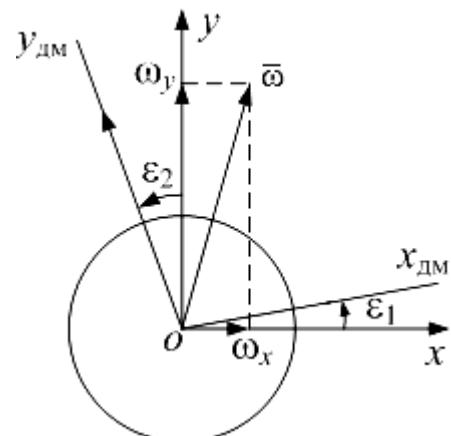
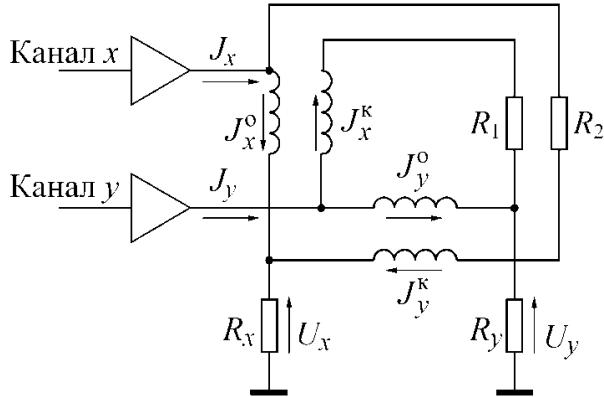


Рис. 2. К определению соотношений проекций угловой скорости ДНГ  $Oxy$  – ортогональная СК связанная с корпусом,  $Ox_{\text{дм}}y_{\text{дм}}$  – аффинная СК связанныя с датчиками момента.

На Рис.2 представлены углы отклонения датчиков момента относительно корпуса, определяющиеся соотношениями:

$$\operatorname{tg} \varepsilon_1 = \frac{K_{yx}}{K_x}, \quad \operatorname{tg} \varepsilon_2 = -\frac{K_{xy}}{K_y}. \quad (3)$$



где,  $J_x$  и  $J_y$  – токи контуров обратной связи, протекающие по измерительным сопротивлениям  $R_x$  и  $R_y$  каналов  $x$  и  $y$ ;  $J_x^0$ ,  $J_y^0$  и  $J_x^k$ ,  $J_y^k$  – токи, протекающие по обмоткам основных и компенсационных каналов, с сопротивлениями  $R_{\text{дм}x}^0$ ,  $R_{\text{дм}y}^0$  и  $R_{\text{дм}x}^k$ ,  $R_{\text{дм}y}^k$ .

Рис.3. Схема компенсации перекрестной чувствительности каналов

С помощью схемы, показанной на Рис.3 можно полностью исключить перекрестную взаимосвязь каналов, используя следующие соотношения:

$$\begin{cases} \omega_x = \left( K_x (1 - \lambda_x) - K_{\text{дм}}^{\text{дм}} \lambda_x \right) J_x \\ \omega_y = \left( K_y (1 - \lambda_y) - K_{\text{дм}}^{\text{дм}} \lambda_y \right) J_y \end{cases}, \quad \text{или} \quad \begin{cases} R_1 = R_{\text{дм}y} \frac{K_x^k}{K_{xy}} - R_{\text{дм}x}^k \\ R_2 = R_{\text{дм}x} \frac{K_y^k}{K_{yx}} - R_{\text{дм}y}^k \end{cases} \quad (4)$$

где  $\lambda_x = \frac{1}{1 + (R_{\text{дм}y}^k + R_2) / R_{\text{дм}x}}$ ,  $\lambda_y = \frac{1}{1 + (R_{\text{дм}x}^k + R_1) / R_{\text{дм}y}}$ ,  $K_{\text{дм}}^{\text{дм}}$  и  $K_{\text{дм}}^{\text{дм}}$  – перекре-

стные крутизны компенсационных обмоток датчиков момента.

**Во второй главе** проведен анализ и моделирование движения системы «гироскоп – поворотный стенд», разработан алгоритм калибровки масштабных коэффициентов и соответствующее программное обеспечение в автоматизированном режиме.

В процессе калибровки гироскоп поочередно устанавливается в положение 1 (ось  $y$  – ось вращения стенд), как показано на Рис.1, и затем в положение 2 (ось  $x$  – ось вращения стенд). В каждом из этих положений сигнал с датчиков угла ДУ<sub>y</sub> (для положения 1) или ДУ<sub>x</sub> (для положения 2) через фазочувствительный детектор и усилитель мощности подается на обмотку двигателя следящей системы, который разворачивает платформу в сторону уменьшения угла рассогласования между ротором и платформой вокруг оси вращения стенд. В моментный датчик канала  $x$  (для положения 1) или  $y$  (для положения 2) подается высокостабильный ток управления от внешнего источника питания вызывающий прецессию ротора гироскопа и, соответственно, вращение платформы в положительном и затем отрицательном направлениях. Датчики углов и моментов ортогональных каналов включены, как показано на Рис.1, в режим «электрической пружины» (ДУС).

Измерение угловой скорости платформы стендса  $\omega_i$  производится с помощью импульсного датчика угла ДУ<sub>п</sub> для запуска электронного хронометра определяющего время каждого оборота платформы  $T$  ( $\gamma=360^\circ$ ) или поворота на фиксированные углы  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  и  $\gamma_3$ , как показано на Рис.1. Таким образом, угловая скорость определяется по результатам измерения как:

$$\omega = \frac{\gamma}{T}. \quad (5)$$

По аналогии с уравнениями (2) могут быть записаны моменты, вызываемые токами  $J_x$  и  $J_y$  в катушках датчиков моментов:

$$\begin{cases} M_{mx} = K'_x J_x + K'_{xy} J_y \\ M_{my} = K'_y J_y + K'_{yx} J_x \end{cases}, \quad (6)$$

где,  $K'_x$ ,  $K'_y$  и  $K'_{xy}$ ,  $K'_{yx}$  – основные и перекрестные масштабные коэффициенты датчиков моментов гироскопа по моменту.

Токи обратной связи, протекающие по катушкам моментных датчиков каналов ДНГ, включенных в режим ДУС, и моменты обратной связи стендса формируются следующим образом:

– для положения 1:  $j_y(s) = K_{dy} K_{yc} W(s) \alpha(s)$ ;  $M_{\pi}(s) = -K_{\pi} W_{\pi}(s) \beta(s)$  (7)

– для положения 2:  $j_x(s) = -K_{dy} K_{yc} W(s) \beta(s)$ ;  $M_{\pi}(s) = -K_{\pi} W_{\pi}(s) \alpha(s)$  (8)

где:  $K_{dy}$  — крутизна датчиков угла ДНГ;  $K_{yc} W(s)$  и  $K_{\pi} W_{\pi}(s)$  – передаточные функции контура обратной связи ДНГ и стендса.

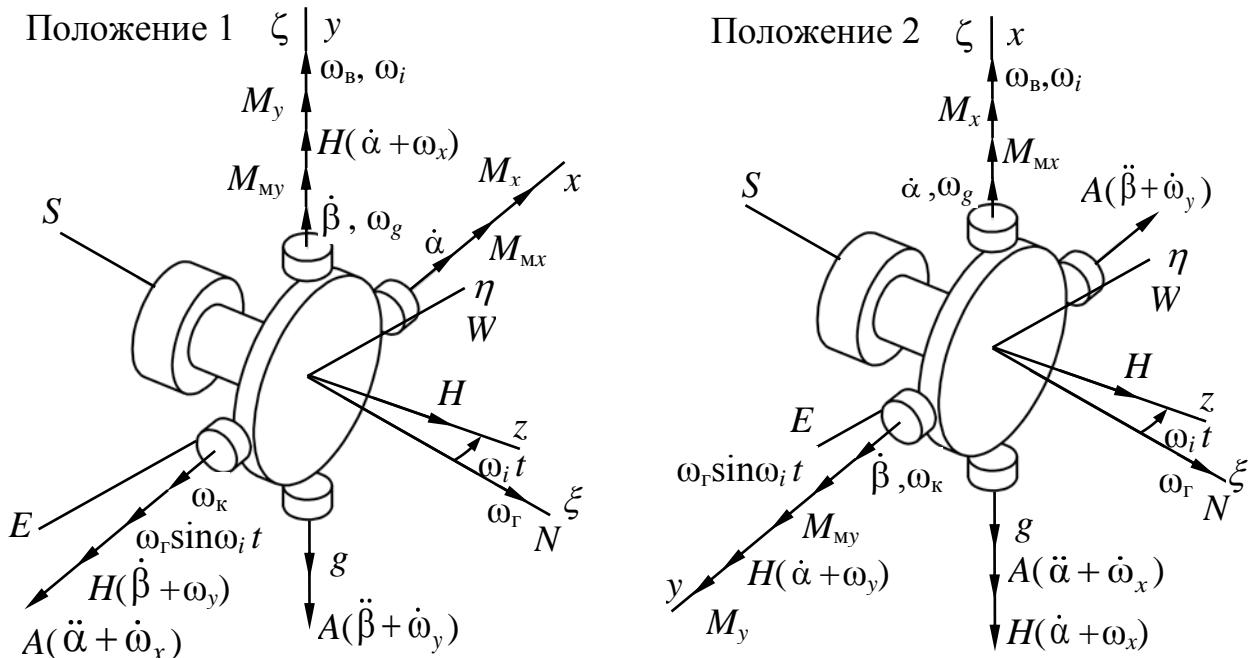


Рис.5. Моменты, приложенные к ротору ДНГ в положениях 1 и 2

где:  $\omega_g$  и  $\omega_k$  – коэффициенты математической модели погрешности ДНГ, связанные с осевым смещением центра масс ротора и квадратурными моментами.

На Рис.5 и 6 показаны элементы кинематики углового движения системы, а также моменты, приложенные к ротору ДНГ и платформе стендса.

С учетом соотношения (6), элементы уравнения движения системы «ги-

роскоп – поворотный стенд»(1) имеют вид:

– для положения 1 ( $i=1, 2$ ):

$$\begin{aligned}\omega_{yi} &= \omega_i + \omega_B, \omega_{xi} = -\omega_r \sin \omega_i t, M_{xi} = H(\omega_{y0} + \omega_g), \\ M_{yi} &= -H(\omega_{x0} - \omega_k), M_{mxi} = K'_x J_{xi} + K'_{xy} j_{yi}, M_{mxi} = K'_y j_{yi} + K'_{yx} J_{xi};\end{aligned}\quad (9)$$

– для положения 2 ( $i=3, 4$ ):

$$\begin{aligned}\omega_{xi} &= \omega_i + \omega_B, \omega_{yi} = \omega_r \sin \omega_i t, M_x = H(\omega_{y0} + \omega_k), \\ M_y &= -H(\omega_{x0} + \omega_g), M_{mxi} = K'_x J_{xi} + K'_{xy} J_{yi}, M_{myi} = K'_y J_{yi} + K'_{yx} j_{xi},\end{aligned}\quad (10)$$

где  $\omega_{x0}$  и  $\omega_{y0}$  – постоянные составляющие дрейфа гироскопа.

Для исключения угловых отклонений ротора гироскопа относительно корпуса в установившемся движении, в передаточные функции усилителей контуров обратной связи  $W(s)$  и  $W_{\pi}(s)$  вводятся интегрирующие звенья. Передаточные функции усилителей контуров обратной связи стенда и каналов ДНГ включенных в режим ДУС, оптимизированных по результатам моделирования, имеют следующий вид:

$$K_{yc}^{\pi} W_{\pi}(s) = K_{yc}^{\pi} \frac{(T_{c1}s + 1)(T_{c2}s + 1)}{T_{c1}s(T_{c3}s + 1)}; \quad K_{yc} W(s) = K_{yc} \frac{(T_1s + 1)}{T_1s(T_2s + 1)^2} \quad (11)$$

В соответствии с уравнениями (7), (9) и (11) на Рис.7 построена структурная схема системы «гироскоп – поворотный стенд» для положения 1 в среде *Simulink (Matlab)*, где выделены основные модули этой системы: гироскоп с контуром обратной связи по каналу  $x$ , поворотная платформа с контуром слежения по оси  $y$  гироскопа и источник постоянного тока обеспечивающий подачу постоянного тока  $J_x$  в моментный датчик  $\Delta M_x$  гироскопа.

При моделировании были использованы следующие исходные данные:

- параметры ДНГ типа ГВК-6:  $A=9.5 \cdot 10^{-6}$  Н·м·с<sup>2</sup>,  $H=200$  сН·см·с,  $K'_x, K'_y = (92 \pm 19)$  сН·см/А,  $K'_{xy}, K'_{yx} = 10\% (K'_x, K'_y)$ ,  $K_{dc}=16.2$  В/рад;
- параметры стендса:  $C_{\pi}=0.053$  Н·м·с<sup>2</sup>,  $D_{\pi}=0.01$  Н·м·с,  $K_{dc}=0.11$  Н·м/А.

Для этих параметров стендса и гироскопа были по результатам моделирования определены параметры контуров обратной связи, обеспечивающие достаточные запасы устойчивости и качество переходных процессов:

– для ДНГ:  $K_{yc}=12$  А/В,  $T_1=0.12$  с,  $T_2=0.012$  с;

– для стендса:  $K_{yc}^{\pi}=4$  А/В,  $T_{c1}=0.15$  с,  $T_{c2}=0.12$  с,  $T_{c3}=0.012$  с.

На Рис.8 представлены результаты моделирования движения ротора гироскопа и платформы при задании угловой скорости ротора гироскопа  $\omega_y=2.6^{\circ}/\text{с}$ , где видно, что через 1 секунду после подачи тока управления переходной про-

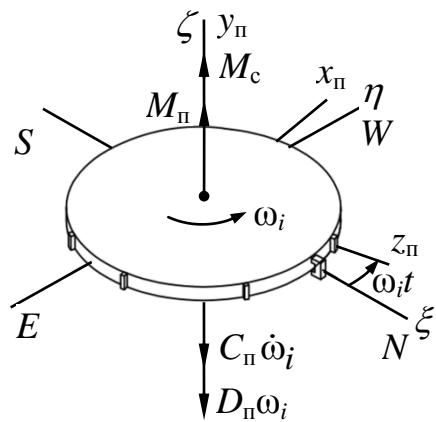


Рис.6. Моменты, приложенные к платформе стендса

цесс практически завершается. Также из графика следует, что установившееся значение угловой скорости ротора ДНГ  $\omega_x$  практически равно нулю, т.к. значения соответствующие собственному дрейфу гироскопа, а также горизонтальной и вертикальной проекции собственного вращения Земли, малы по сравнению с задаваемой угловой скоростью стенда. Угловая скорость платформы  $\omega_i$  также практически равна угловой скорости прецессии ротора гироскопа  $\omega_y$  по вертикальной оси в установленвшемся движении.

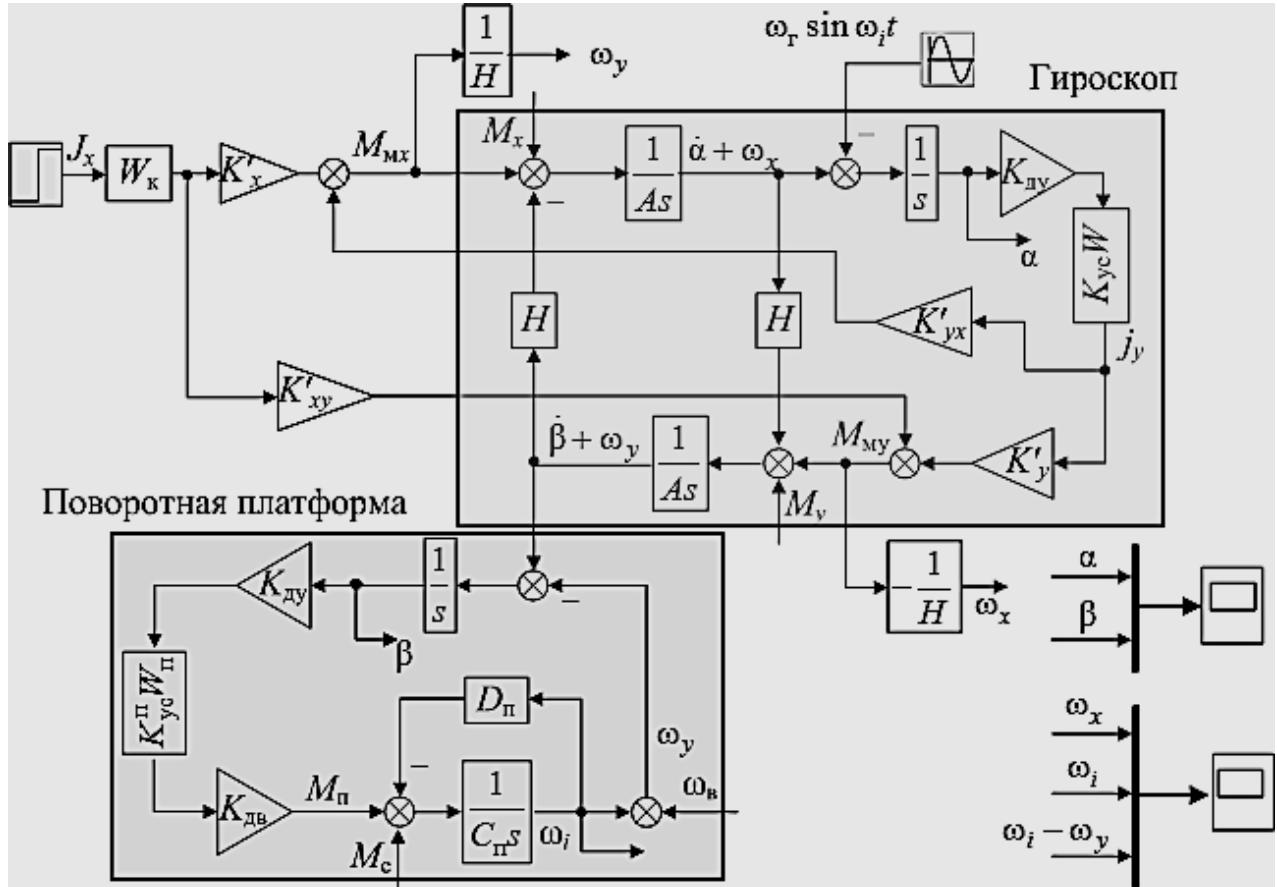


Рис.7. Структурная схема системы «гироскоп – поворотный стенд» в положении 1  
 $W_k(s)$  используется для сглаживания переходного процесса при подаче тока от источника тока

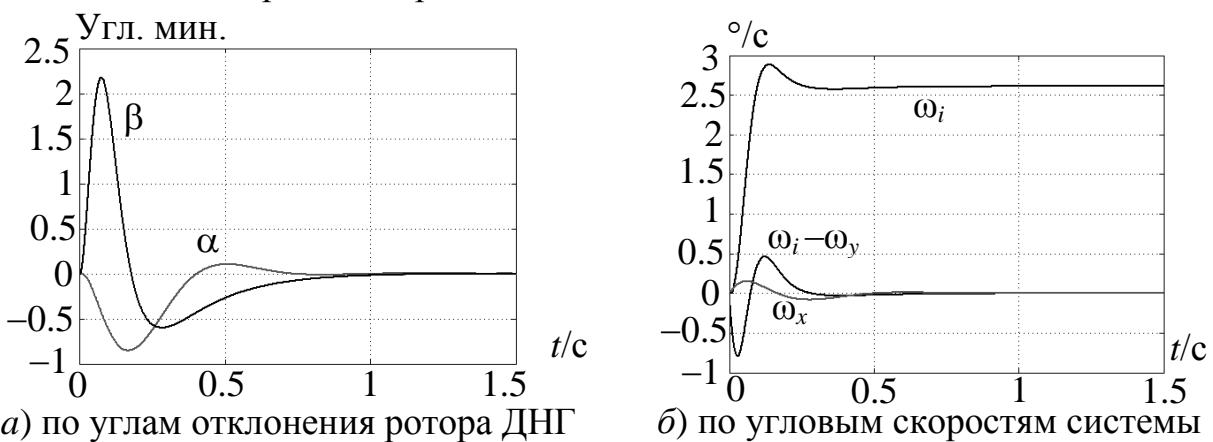


Рис.8. Переходные процессы в положении 1

С учетом соотношений (9) и (10), уравнения (1), для установившегося движения системы, могут быть записаны в следующем виде:

– для положения 1 ( $i = 1, 2$ )

$$\begin{pmatrix} K_x & K_{xy} \\ K_{yx} & K_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j_{xi}(t) \\ J_{yi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_{x0} - \omega_k \\ \omega_{y0} + \omega_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_r \sin \omega_i t \\ \omega_i(t) + \omega_B \end{pmatrix}; \quad (12)$$

– для положения 2 ( $i = 3, 4$ )

$$\begin{pmatrix} K_x & K_{xy} \\ K_{yx} & K_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_{xi} \\ j_{yi}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_{x0} + \omega_g \\ \omega_{y0} + \omega_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_i(t) + \omega_B \\ \omega_r \sin \omega_i t \end{pmatrix}. \quad (13)$$

В системах уравнений (12) и (13) измеряемыми величинами являются токи обратной связи  $j_{xi}$  и  $j_{yi}$  в моментных датчиках, а также угловые скорости стенда  $\omega_i$ , которые, как видно из этих соотношений, помимо постоянной составляющей определяются также и гармонической, вызываемой горизонтальной проекцией собственного вращения Земли.

Для определения масштабных коэффициентов гироскопа необходимо для каждого из 4-х испытаний усреднить измеряемые значения за некоторый промежуток времени  $t$ , после исключения постоянных составляющих дрейфа гироскопа для положений 1 и 2, решая полученную систему уравнений относительно масштабных коэффициентов находим:

$$\begin{cases} K_x = \frac{\omega_{34}}{\Delta J_{34}(1-\delta)} - \frac{\delta \cdot \chi(\gamma)}{\Delta \bar{j}_{12}(1-\delta)} \omega_r; \\ K_{xy} = -K_x \frac{\Delta \bar{j}_{12}}{\Delta J_{12}} + \omega_r \frac{\chi(\gamma)}{\Delta J_{12}}; \end{cases} \quad \begin{cases} K_y = \frac{\omega_{12}}{\Delta J_{12}(1-\delta)} - \frac{\delta \cdot \chi(\gamma)}{\Delta \bar{j}_{34}(1-\delta)} \omega_r; \\ K_{yx} = -K_y \frac{\Delta \bar{j}_{34}}{\Delta J_{34}} + \omega_r \frac{\chi(\gamma)}{\Delta J_{34}}, \end{cases} \quad (14)$$

где:  $\Delta \bar{j}_{12} = \bar{j}_{y1} - \bar{j}_{y2}$ ,  $\Delta \bar{j}_{34} = \bar{j}_{x3} - \bar{j}_{x4}$ ,  $\Delta J_{12} = J_{x1} - J_{x2}$ ,  $\Delta J_{34} = J_{y3} - J_{y4}$ ,

$$\omega_{34} = \omega_3 - \omega_4, \quad \omega_{12} = \omega_1 - \omega_2, \quad \delta = \frac{\Delta \bar{j}_{12} \Delta \bar{j}_{34}}{\Delta J_{12} \Delta J_{34}}, \quad \chi(\gamma) = \frac{2}{\gamma} (1 - \cos \gamma).$$

Функция  $\chi(\gamma)$  при увеличении времени усреднения уменьшается, а при усреднении за каждый оборот платформы она строго равна нулю и, таким образом, влияние горизонтальной проекции собственного вращения Земли на точность калибровки ДНГ может быть полностью исключено.

Из полученных соотношений (14) следует, что точность калибровки определяется точностью измерения угловых скоростей стенда  $\omega_1 \dots \omega_4$  и токов в моментных датчиках  $j_{xi}$ ,  $j_{yi}$ ,  $J_{xi}$ ,  $J_{yi}$ . Точность измерения угловой скорости платформы определяется точностью измерения углов поворота платформы  $\gamma_1 \dots \gamma_4$  и соответствующего времени  $t_1 \dots t_4$  разворота на эти углы:

– углы поворота платформы можно измерить с помощью датчика угла аналогичного ДУ в ДНГ используя его в импульсном режиме. Эти углы можно с высокой точностью определить в процессе предварительной аттестации стендса, например, с помощью оптического теодолита типа 3Т2КП компании УОМЗ имеющего точность 2''. Точность измерения углов поворота платформы с помощью импульсного ДУ не хуже  $\Delta_1 = 10^{-3} \%$ , при измерении углов  $> 120^\circ$ .

– время разворота платформы на заданный угол можно определить с помощью серийных измерительных приборов, например, частотометров типа ЧЗ-

54 или ЧЗ-57 имеющих точность не ниже  $\Delta_2=10^{-5}\%$ .

Точность задания и измерения токов  $j_{xi}, j_{yi}, J_{xi}, J_{yi}$  определяется стабильностью источника питания, в качестве которого можно использовать, например, высокостабильный источник питания типа BK *Precision 9184*, и точностью измерительного прибора, например электронного прецизионного вольтметра типа 3458A (*Agilent Technologies, USA*) с точностью  $\Delta_3=0.06 \cdot 10^{-3}\%$ .

Таким образом, с учетом вышеприведенной оценки определения отдельных параметров измерительной системы, итоговая погрешность определения масштабных коэффициентов может быть обеспечена не хуже

$$\Delta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2} = 0.001\%.$$

**В третьей главе** разработана кинематическая схема контрольно-испытательного поворотного стенда, представлены его основные характеристики; и разработана 3-D модель конструкции поворотного стенда в среде *SolidWorks* (Рис.9). Представленная конструкция стендса состоит из: основания 4; двигателя следящей системы 5; коллекторного токоподвода 6; вала 7; платформы 2, кронштейна 8 для установки гироскопа 1; датчика угла поворота платформы 3, статор которого закреплен на основании 4, а элементы подвижной части зафиксированы на платформе 2.

В настоящей диссертационной работе на основе разработанной 3-Д модели стендса проведен анализ его кинематической схемы и массовых характеристик необходимых для формирования контура обратной связи следящей системы.

Для обеспечения высокоточного измерения угловой скорости вращения стендса используется датчик аналогочный датчику угла ДНГ в качестве импульсного датчика, принципиальная схема формирования импульсного сигнала которого представлена на Рис.10. Выходное напряжение  $U_1(\gamma)$  с мостовой схемы поступает сначала на предварительный усилитель и выпрямитель, и далее в виде  $U_2(\gamma)$  поступает на компаратор. Передний фронт сформированного импульса  $U_3(\gamma)$  запускает счетчик времени.  $U_4$  – напряжение, определяющее порог срабатывания компаратора. Точ-

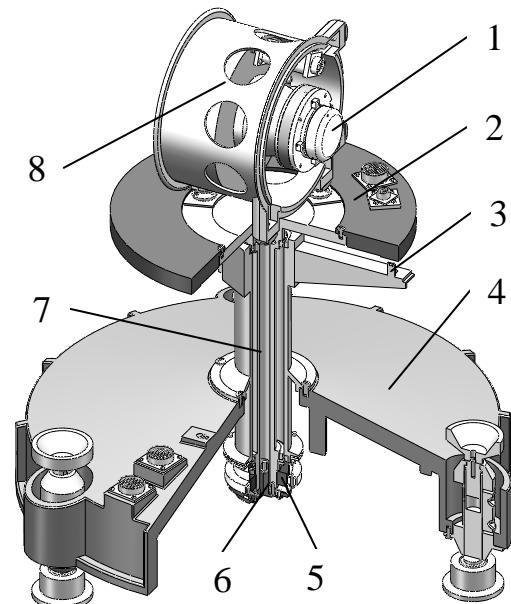


Рис.9. Конструкция стендса

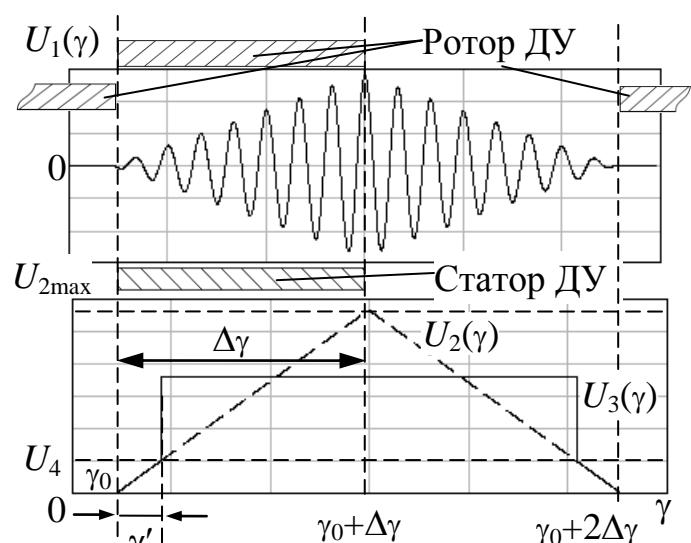


Рис.10. Принципиальная схема формирования импульса

нность измерения угла поворота платформы за один оборот ( $360^\circ$ ) определяется формулой:  $\Delta\gamma = \frac{\gamma'}{2\pi} = \frac{U_4}{U_{2\max}} \cdot \frac{a}{\pi D} \cdot 100\%$ , где:  $a$  – ширина полюса магнитопровода

$D_U$ ,  $D$  – диаметр окружности на которой расположен  $D_U$ ,  $\gamma'$  – угол поворота платформы при срабатывании компаратора.

**В четверной главе** проведены экспериментальные исследования разработанного алгоритма калибровки масштабных коэффициентов ДНГ с использованием одноосного поворотного стенда в режиме следящей системы; представлено сравнение эксперимента с результатами теоретического анализа, которое показало их хорошее совпадение; даны рекомендации к практическому применению предложенного метода калибровки гироскопов.

На Рис.11 представлен вид рабочего места для экспериментальной отработки алгоритмов калибровки динамически настраиваемого гироскопа типа ГВК-6 с использованием предложенного измерительного комплекса «гироскоп – поворотный стенд». Ниже на Рис.12. приведен алгоритм калибровки ДНГ в автоматизированном режиме на измерительном комплексе. В исходном положении корпус стендса устанавливается таким образом, чтобы его система координат  $\xi\eta\zeta$  осью  $\xi$  была ориентирована на север.



Рис.11.Внешний вид рабочего места для проведения экспериментальных исследований измерительного комплекса «гироскоп – поворотный стенд»

В данной работе время полного оборота платформы  $T$  измерялось таймером платы сопряжения с точностью  $\Delta T = 6.7 \cdot 10^{-6} \%$ . Погрешность измерения угловой скорости в процессе экспериментальных исследований составляла  $\Delta\omega = 0.35 \cdot 10^{-3} \%$ . АЦП платы сопряжения имел погрешность измерения токов в обмотках моментных датчиков  $\Delta J_{\text{АЦП}} = 0.1\%$  от диапазона измерения. Величина среднеквадратического отклонения измеряемых токов в реальных условиях эксперимента не превышала  $\Delta J_y = 0.14 \%$ , что практически соответствует погрешности АЦП. Таким образом, точность калибровки масштабных коэффициентов при проведении эксперимента составляла  $\Delta = \sqrt{\Delta\omega^2 + \Delta J_y^2} = 0.14 \%$ , и определяется, в основном, условиями проведения испытаний и качеством АЦП.

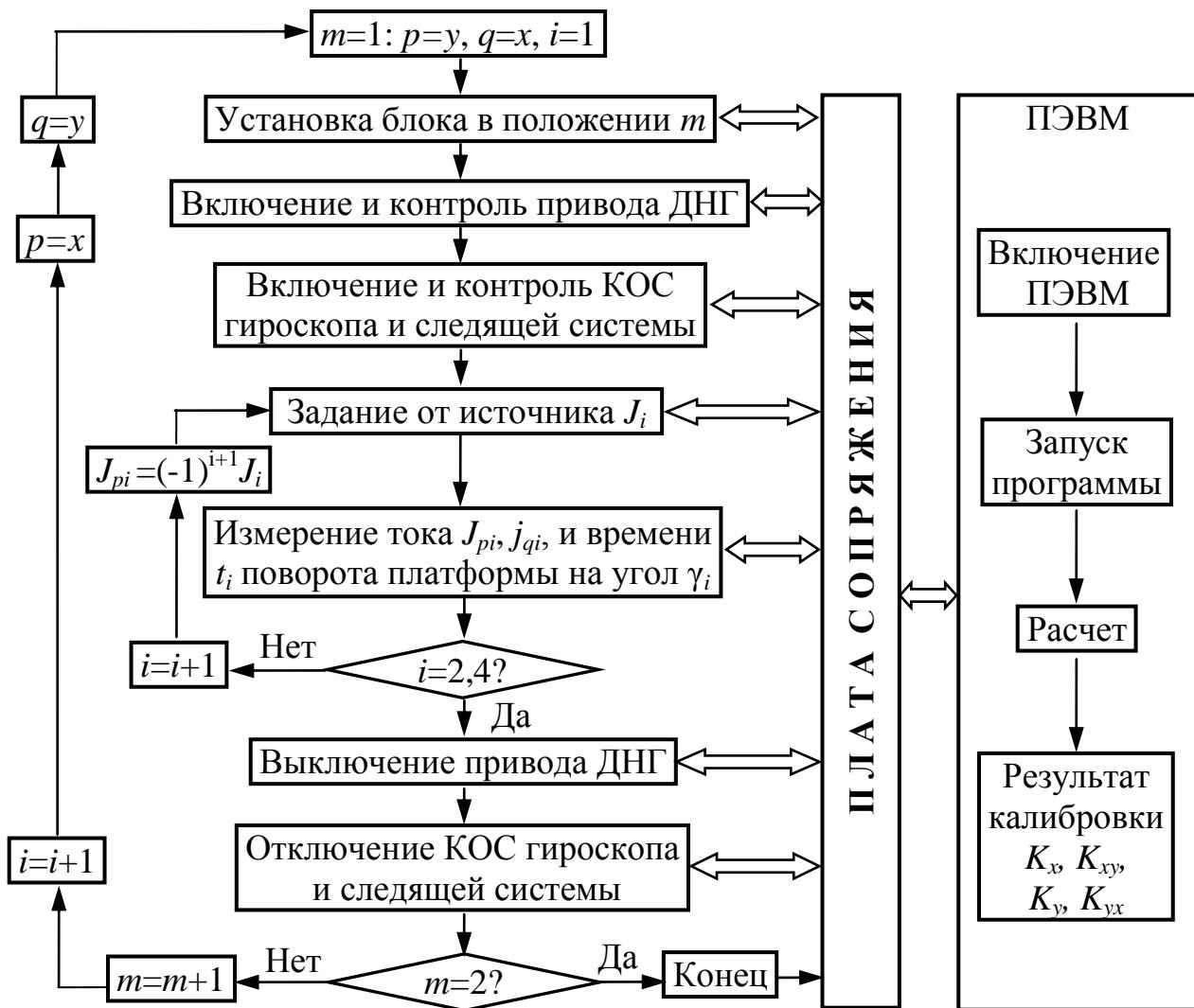


Рис.12. Алгоритм калибровки

Для оценки масштабных коэффициентов проведено 6 серий испытаний при разных токах управления: (40, 50, 60, 70, 80, 90) мА. В Таблице 1 представлены результаты калибровки масштабных коэффициентов ДМ ГВК-6.

Таблица 1.

Результаты калибровки масштабных коэффициентов

Серия	Результаты калибровки [ $^{\circ}/\text{ч}$ ]/мА]			
	$K_x$	$K_{xy}$	$K_y$	$K_{yx}$
1	73.8317	0.7924	74.4009	-0.8256
2	74.0125	0.7879	74.3229	-0.8277
3	73.9464	0.7869	74.2404	-0.8245
4	73.9303	0.7877	74.2209	-0.8225
5	73.9432	0.7883	74.2457	-0.8235
6	73.9295	0.7892	74.2767	-0.8235

Для повышения точности калибровки необходимо обеспечить испытательный комплекс: 14-ти разрядным АЦП, активным или пассивным «развязанным фундаментом», термостатированием калибруемого гироскопа. Для аппроксимации данных гироскопа в канале ортогональном оси вращения стенда использован метод наименьших квадратов (МНК), а в качестве аппроксимирующей функции использована гармоническая функция:

$$\omega(t) = \omega_a + \omega_b \cdot \sin\left(\frac{\pi}{180}\omega_c \cdot t + \psi\right) \quad (16)$$

Сравнение уравнений (12), (13) с (16) видно, что величина  $\omega_b$  соответствует проекции горизонтальной составляющей собственной скорости вращения Земли  $\omega_r = U \cos \phi = 8.442^\circ/\text{ч}$  ( $U=15^\circ/\text{ч}$  – угловая скорость вращения Земли,  $\phi = 55^\circ 45'$  – широта Москвы). Разница между математическим ожиданием  $\omega_b$  в Таблице 2 и  $\omega_r$  показывает, что при испытании, помимо погрешностей измерения токов  $\Delta J$ , возможно имело место отклонение оси вращения стенда от вертикали на  $\approx 42$  угл.мин.

Таблица 2.

Значения  $\omega_b$  для 6 серий [ $^\circ/\text{ч}$ ]

Серия	1	2	3	4	5	6	Средние
Y↑ω↑	8.6041	8.5290	8.5780	8.5259	8.5673	8.7076	8.5945
Y↑ω↓	8.4616	8.4674	8.5269	8.4662	8.4340	8.5521	
X↑ω↑	8.5445	8.5386	8.5181	8.5058	8.4259	8.7519	
X↑ω↓	8.6758	8.6825	8.8353	8.7966	8.8464	8.7256	

С учетом полученных результатов эксперимента, в Таблице 3 представлены углы отклонения датчиков момента относительно корпуса, определяющие соотношениями (3).

Таблица 3.

Отклонения осей датчиков момента  $\Delta M_x$  и  $\Delta M_y$  относительно осей связанных с корпусом ДНГ

Серия	1	2	3	4	5	6	Средние
$\varepsilon_1$ [град.]	-0.6407	-0.6408	-0.6388	-0.6374	-0.6381	-0.6382	-0.6390
$\varepsilon_2$ [град.]	-0.6102	-0.6074	-0.6073	-0.6081	-0.6083	-0.6088	-0.6083

По результатам представленных в Таблице 3, можно констатировать, что оси датчиков момента  $\Delta M_x$  и  $\Delta M_y$  одновременно развернуты по часовой стрелке на угол  $0.62^\circ$  относительно корпуса, и относительно этого среднего угла поворота системы координат связанной с датчиками момента, ось датчика момента  $\Delta M_x$  повернута на угол  $\Delta \varepsilon_1 = 0.92$  угл.мин по часовой стрелке, а ось датчика момента  $\Delta M_y$  повернута на угол  $\Delta \varepsilon_2 = 0.92$  угл.мин против часовой стрелки. Скомпенсировать погрешности угловой выставки датчиков момента можно с помощью дополнительной обмотки (Рис.3) в датчиках момента, подавая часть токов основных каналов на дополнительные обмотки ортогональных каналов.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы и выводы по ней.

1. Получены и исследованы уравнения движения комплексной системы «гироскоп – поворотный стенд», на базе одноосной следящей системы, учитывающие особенности совместной динамики гироскопа и стендса.

2. На основе полученных уравнений проведено моделирование работы системы в переходном и установившемся режимах в среде *Simulink (Matlab)* и выбраны оптимальные параметры контуров обратной связи гироскопа и поворотного стендса в режиме следящей системы, обеспечивающие высокую точ-

ность калибровки матрицы масштабных коэффициентов ДНГ .

3. Приведена оценка влияния собственной скорости вращения Земли и собственного дрейфа гироскопа на точностные характеристики разработанного алгоритма калибровки и даны рекомендации по снижению влияния этих факторов на точность калибровки.

4. Разработана 3-D модель конструкции контрольно-испытательного поворотного стенда в среде *SolidWorks*, промоделирована кинематика движения, проведен расчет его упруго-массовых характеристик, необходимых для выбора параметров контура обратной связи следящей системы стенда.

5. Предложенное конструктивное исполнение испытательного поворотного стенда, измерительная аппаратура и алгоритм калибровки прецизионных динамически настраиваемых гироскопов позволяют обеспечить определение их масштабных коэффициентов с точностью 0.001%.

6. Разработано программное обеспечение позволяющее считывать данные с измерительных каналов гироскопа и через АЦП и модуль сопряжения передавать их на компьютер, графически визуализировать процесс калибровки на дисплее компьютера в реальном времени, а также производить их запись в базу данных на жестком диске.

7. Разработаны, изготовлены и отложены электронные модули контроля углового положения платформы поворотного стенда, контуров обратной связи гироскопа и следящей системы и сервисные схемы необходимые для совместного функционирования гироскопа и стенда.

8. Проведенные экспериментальные исследования разработанного алгоритма калибровки масштабных коэффициентов ДНГ на одноосном поворотном стенде, включенном в режим следящей системы, и сравнение их с результатами теоретического анализа показали хорошее совпадение и определили рекомендации к практическому применению предложенного метода прецизионной калибровки гироскопов.

9. Испытания комплекса «гироскоп – поворотный стенд» с разработанными алгоритмами, сервисной электроникой и программным обеспечением подтвердили правильность заложенных в нем основных принципов его работы и показали возможности работы комплекса в автоматизированном режиме.

### **Основные результаты диссертации изложены в работах**

1. Цинь Цзыхао, Метод калибровки ДУС инерциального класса на одноосном гиростабилизаторе // Молодежный научно-технический вестник. 2015. №1. 14 с (0,85 п.л. / 0,85 п.л.).

2. Подчезерцев В.П., Цинь Цзыхао, Тан Синюань. Компоненты модели погрешностей динамически настраиваемого гироскопа // Авиакосмическое приборостроение. 2015. №1. С. 8 – 18 (1 п.л. / 0,35 п.л.).

3. Цинь Цзыхао, Подчезерцев В.П. Влияние конструктивных особенностей и параметров газового заполнения на характеристики ДНГ // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2017. № 2. С. 4-20 (1.5 п.л. / 0,75 п.л.).

4. Подчезерцев В.П., Цинь Цзыхао. Моделирование калибровки ДНГ на одноосном гиростабилизаторе // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 10. 14 с (0,85 п.л. / 0,45 п.л.).