

# УПРАВЛЕНИЕ УГЛОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ ОДНООСНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ГИРОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*В.В. Седышев, П.Е. Белочкин*

Рассмотрены вопросы разработки одноосного стенда для испытаний гироскопических приборов и систем. Требуемая точность задания угловой скорости реализована за счет применения инерциальных чувствительных элементов (акселерометров) в системе управления рабочей площадкой испытательного стенда. Для выбранной кинематической схемы построена математическая модель стенда, определена структурная схема объекта управления. Предложена конструкция одноосного испытательного стенда на основе синхронной электромашинки вентильного типа. Описаны основные конструктивные элементы разработанного стенда. На основе анализа алгоритмов автоматического управления угловым движением одноосного стенда выбрано корректирующее устройство (регулятор). Представлена методика определения оптимальных параметров регулятора управления угловым движением. Исследован метод настройки регулятора в режиме оптимизации программной среды VisSim. Обоснована возможность получения требуемых показателей качества переходного процесса при помощи ПИ-регулятора. Проведено моделирование системы с синтезированным регулятором. Отмечена возможность применения полученных результатов для определения параметров регуляторов сепаратных каналов двух- и трехосных испытательных стендов.

*Ключевые слова:* испытательный стенд, автоматическое управление, параметрическая оптимизация, численное моделирование.

## Введение

Определение соответствия гироскопических систем установленным критериям работоспособности выполняется путем проведения испытаний в лабораторных условиях, которые включают в себя проверку функционирования и калибровку приборов ориентации. Указанные испытания реализуются на испытательных стендах (ИС), которые содержат в своем составе управляемую платформу, скорость которой поддерживается с высокой точностью.

Обеспечение точности и стабильности вращения платформы одноосного стенда обеспечивается за счет включения в состав стенда прецизионных чувствительных элементов, а также за счет синтеза регулятора системы управления ИС.

Несмотря на развитые современные методы решения задачи структурного синтеза регулятора, подавляющее большинство промышленных систем управления основаны на регуляторах первого и второго порядка известной структуры (П-, И-, ПИ-, ПД-, ПИД-регуляторы). Эти регуляторы в большинстве случаев позволяют обеспечить приемлемое управление, так как имеют достаточно разработанные методики настройки. Однако при решении конкретной задачи управления возникают трудности, связанные с выбором структуры и параметров регулятора для обеспечения заданной точности управления.

Целью данной статьи является разработка одноосного стенда для испытаний гироскопических систем и синтез регулятора системы управления стендом.

## 1. Выбор кинематической схемы

Кинематическая схема одноосного ИС, которая наиболее удовлетворяет требованиям исследований поведения углового движения гироскопических систем, представлена на рис. 1.

Данная схема представляет собой одноосный ИС с двумя акселерометрами линейных ускорений, закрепленными на платформе так, что один из них является измерителем тангенциального ускорения  $a_\tau$ , а второй – центростремительного  $a_{ц}$  [2]. Акселерометры входят в состав цепи обратной связи системы управления платформой ИС. В системе управления ИС формируется информация об угловой скорости и угловом ускорении платформы, используемая для построения управляющего функционала для системы управления двигателем (СУ ДВ).

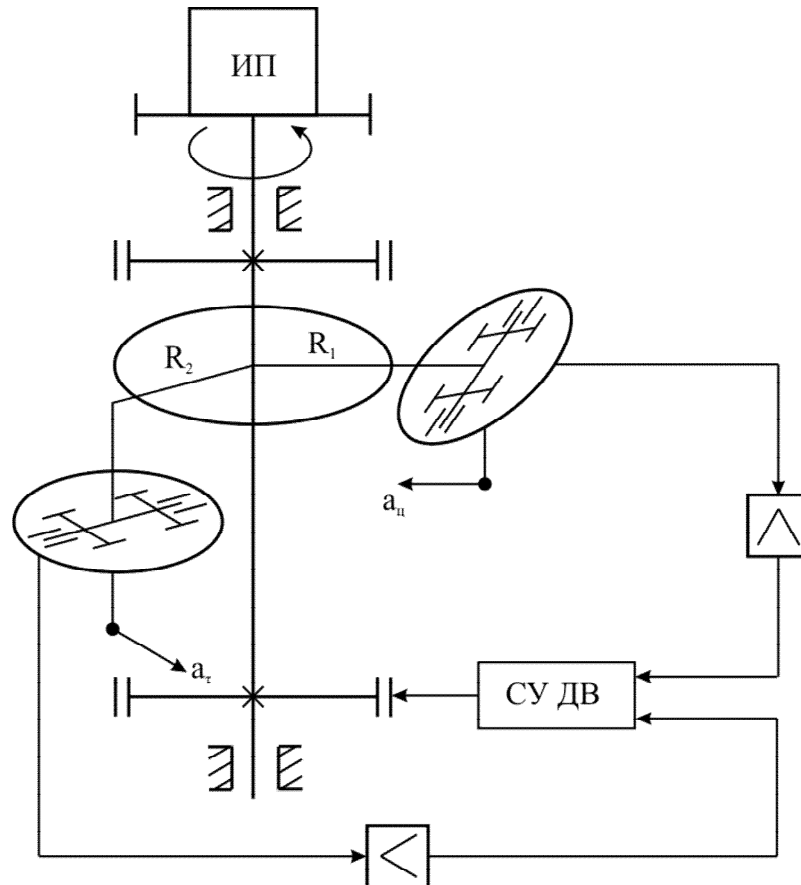


Рис. 1. Кинематическая схема ИС

Представленная кинематическая схема ИС (см. рис. 1) обладает наилучшими эксплуатационными характеристиками, необходимыми для построения широкоскоростного стенда [2]. В связи с этим данную схему можно считать предпочтительной при разработке ИС.

## 2. Конструкция испытательного стенда

Разработка одноосного ИС выполнена на основе концепции схмотехнических решений испытательных стендов, а также анализа точностных характеристик различных гироскопических приборов и систем [1, 2]. При проектировании стенда использовались знания ведущих отечественных и мировых производителей стендовой аппаратуры.

Конструкция одноосного ИС представлена на рис. 2. Вращающаяся часть одноосного ИС 1 (платформа) представляет собой стальной диск с универсальными крепежными отверстиями. В конструкции платформы предусмотрены специальные балансировочные узлы для устранения дисбаланса вращающейся части одноосного ИС. Конструкция платформы, балансировочных узлов и электроразъемов обеспечивает удобство и безопасность установки испытуемого прибора и его коммутации.

На обратной стороне платформы установлены чувствительные элементы одноосного ИС – акселерометры. Акселерометры 8 образуют пару, измеряющую тангенциальное ускорение, акселерометры 9 образуют пару, измеряющую центростремительное ускорение. Информация с каждой пары комплексируется с целью обеспечения инвариантности ИС к неперпендикулярности установки оси платформы.

Платформа приводится во вращение посредством синхронной электромашинки вентильного типа (ВМ) 6, который посредством фланца 12 консольно крепится к корпусу ИС 3. Питание ВМ и съем информации осуществляется с помощью штекерных разъемов 13. Управление вентильным двигателем производится специальным программным обеспечением.

Телеметрическая информация с испытуемого прибора снимается посредством коллекторного узла 2, обеспечивающего неограниченное вращение платформы ИС. Коллекторный узел имеет

два канала съема информации по 8 кольцам каждый (всего 16 колец). Каждый канал продублирован дважды, что обеспечивает высокую надежность передачи информации. Корпус 10 предназначен для защиты коллекторного узла от неблагоприятных воздействий внешней среды, а также для безопасности обслуживающего персонала.

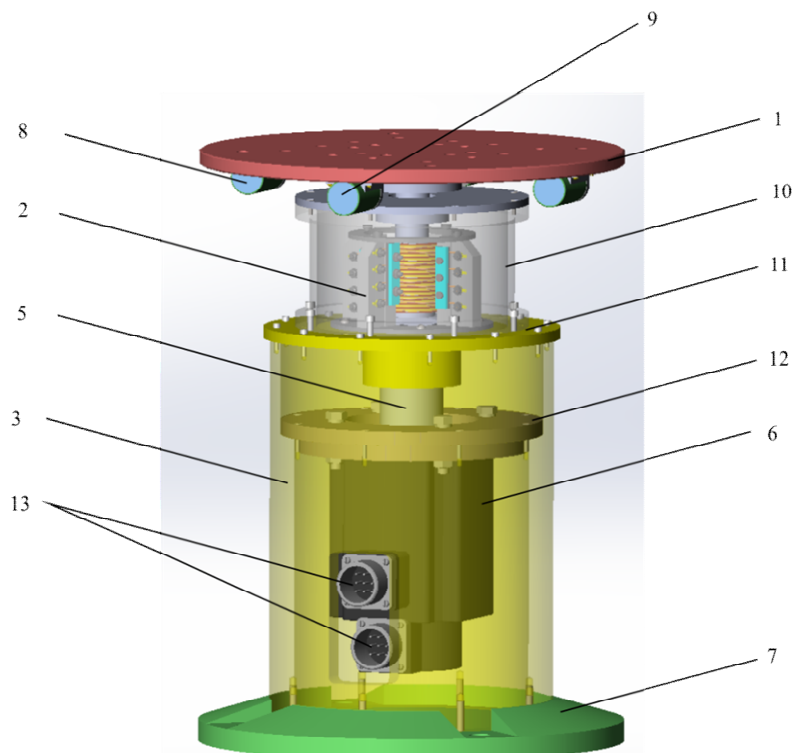


Рис. 2. Конструкция ИС

Крутящий момент передается от двигателя к платформе через вал 5. Соединение вала с двигателем – шпоночное или посредством муфты, соединение вала с платформой – фланцевое. Вал установлен в сдвоенных радиально-упорных подшипниках, воспринимающих осевую нагрузку, а также в радиальном подшипнике, воспринимающем радиальные нагрузки при значительных скоростях вращения. Сдвоенные радиально-упорные подшипники являются фиксирующей опорой и расположены в нижней части конструкции. Радиальный подшипник является плавающей опорой и расположен в верхней части конструкции ИС. Оба подшипника устанавливаются с предварительным натягом. Опоры выполнены таким образом, чтобы полностью исключить осевую нагрузку на вал двигателя.

Следует отметить, что разработка одноосного ИС выполнялась с использованием системы автоматизированного проектирования (САПР) SolidWorks. Применение данного программного обеспечения позволило ускорить процесс разработки ИС за счет использования новейших средств автоматизированного проектирования – библиотек проектирования, прямого редактирования геометрии, экспертных систем, а также систем инженерного анализа. Проведенные расчеты основных деталей и узлов были подтверждены проведением инженерного анализа на их прочность и жесткость. Кроме того, было выполнено моделирование динамики стенда и имитация процессов сборки, разборки. Имитация сборки может быть использована в дальнейшем для разработки технологической документации.

### 3. Построение математической модели

Исследование любого разрабатываемого прибора подразумевает следующую методику, состоящую из нескольких этапов: физическая, математическая, численная модели; лабораторный и/или натурный эксперимент.

В качестве физической модели рассмотрим кинематическую схему (см. рис. 1). Математическая модель основывается на системе уравнений движения и является основой для разработки лю-

бой автоматической системы, в том числе одноосного ИС. На ее основе определяются требования к характеристикам элементов автоматической системы, режимам работы оборудования и т. д.

На рис. 3 представлены системы координат, используемые при построении математической модели ИС:

$O_{00}\xi_a\eta_a\zeta_a$  – инерциальная система координат;

$O_{00}\xi_k\eta_k\zeta_k$  – система координат, связанная с корпусом управляемого основания;

$O_{00}\xi_0\eta_0\zeta_0$  – система координат, вращающаяся вокруг оси  $O_{00}\eta_0$  с постоянной угловой скоростью  $\omega_0 = \text{const}$ ;

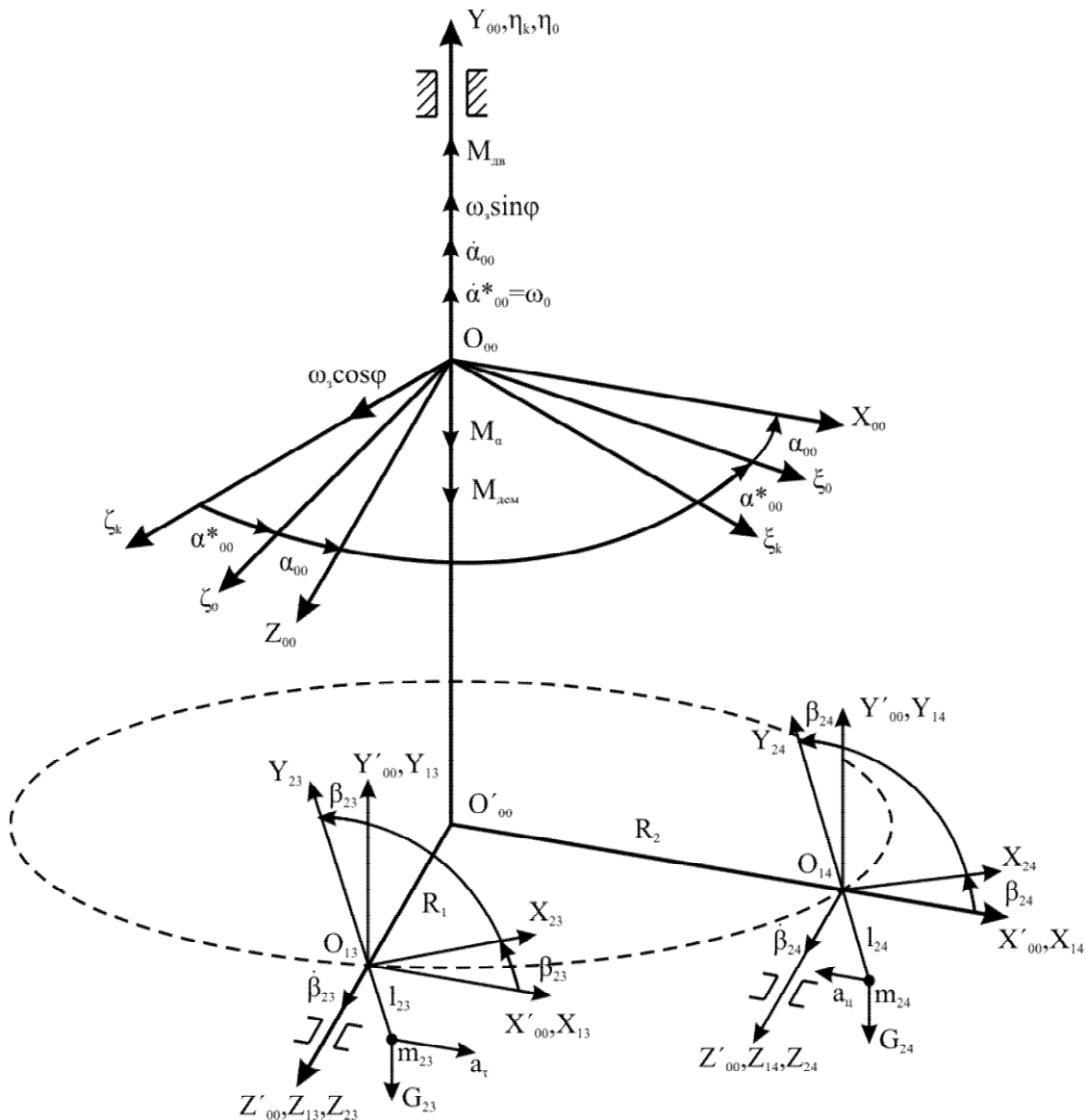
$O_{00}X_{00}Y_{00}Z_{00}$  – система координат, связанная с осью платформы с испытуемым прибором, где  $O_{00}$  – центр масс элемента «00» с платформой;

$O_{13}X_{13}Y_{13}Z_{13}$  – система координат, связанная с корпусом акселерометра, измеряющего тангенциальное ускорение;

$O_{23}X_{23}Y_{23}Z_{23}$  – система координат, связанная с чувствительным элементом (кварцевой пластиной) акселерометра, измеряющего тангенциальное ускорение;

$O_{14}X_{14}Y_{14}Z_{14}$  – система координат, связанная с корпусом акселерометра, измеряющего центростремительное ускорение;

$O_{24}X_{24}Y_{24}Z_{24}$  – система координат, связанная с кварцевой пластиной акселерометра, измеряющего центростремительное ускорение.



**Рис. 3. Системы координат**

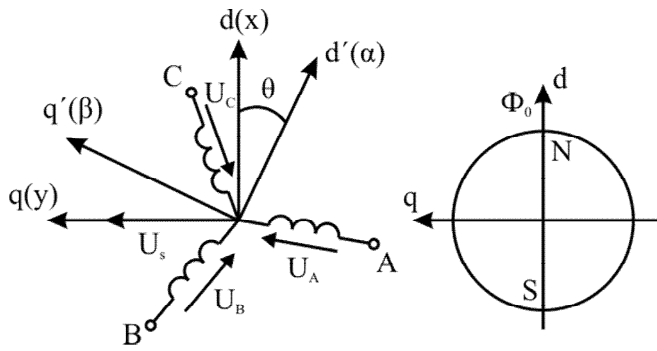


Рис. 4. Физическая модель вентильной машины с постоянными магнитами

При выводе уравнений движения одноосного ИС использовалась физическая модель синхронной вентильной машины с постоянными магнитами, представленная на рис. 4 и состоящая из следующих составляющих:  $\vec{U}_A, \vec{U}_B, \vec{U}_C$  – векторы фазных напряжений,  $\vec{U}_S$  – пространственный вектор напряжения,  $\vec{\Phi}_0$  – пространственный вектор магнитного потока ротора (машина с возбуждением от постоянных магнитов),  $d'q'(\alpha\beta)$  – неподвижная система координат,  $dq(xy)$  – вращающаяся система координат.

Движение одноосного ИС описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 I_{y00}\ddot{\alpha}_{00} + n_{\alpha 00}\dot{\alpha}_{00} &= M_{дв}^0 - M_{\alpha}^0; \\
 I_{23z}\ddot{\beta}_{23} + n_{\beta 23}\dot{\beta}_{23} + C_{23}\beta_{23} + k_{дм23}i_{23} &= \frac{G_{23}l_{23}}{g}\ddot{\alpha}_{00}R_1 - M_{\beta 23}; \\
 I_{24z}\ddot{\beta}_{24} + n_{\beta 24}\dot{\beta}_{24} + C_{24}\beta_{24} + k_{дм24}i_{24} &= \frac{G_{24}l_{24}}{g}\dot{\alpha}_{00}^2R_2 - M_{\beta 24}; \\
 U_d &= R_S i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \dot{\alpha}_{00}L_q i_q; \\
 U_q &= R_S i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \dot{\alpha}_{00}L_d i_d + \dot{\alpha}_{00}\Phi_0; \\
 M_{дв}^0 &= p \frac{m}{2} (i_q (L_d i_d + \Phi_0) - i_d (L_q i_q)).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Таким образом, система уравнений (1) является математической моделью разрабатываемого одноосного ИС.

#### 4. Численное моделирование

Моделирование является важным этапом при исследовании и проектировании любой информационно-измерительной системы, в том числе и одноосного ИС. На основании полученной математической модели одноосного испытательного стенда (1) записаны передаточные функции элементов системы и построена структурная схема управления ИС. Модель одноосного ИС, созданная в модуле Simulink программы Matlab, представлена на рис. 5.

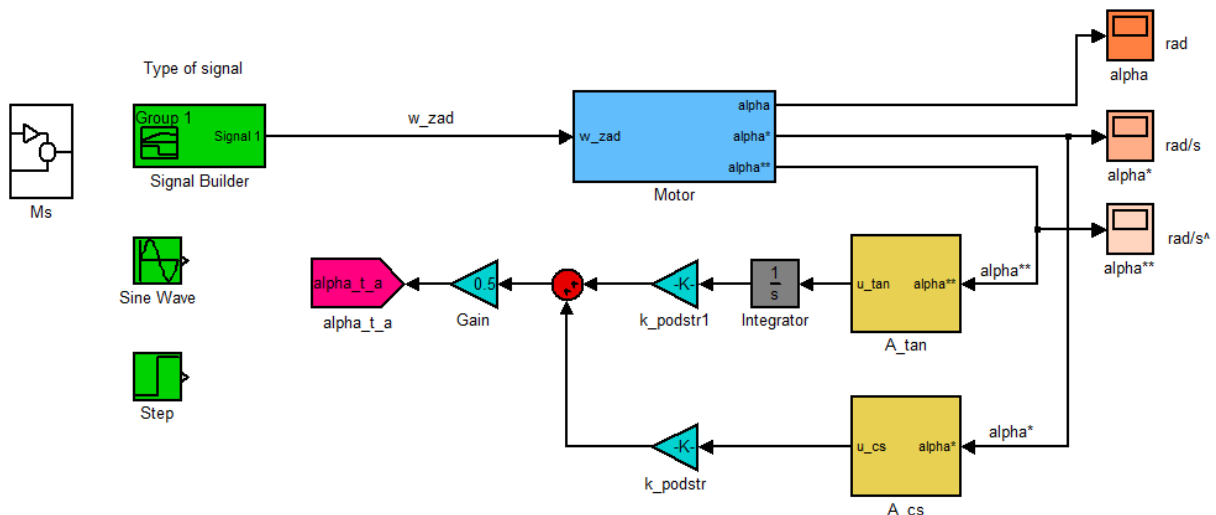


Рис. 5. Схема моделирования одноосного ИС в Simulink

В состав виртуальной модели одноосного ИС входят следующие блоки и модули:

*Ms* – блок задания помех;

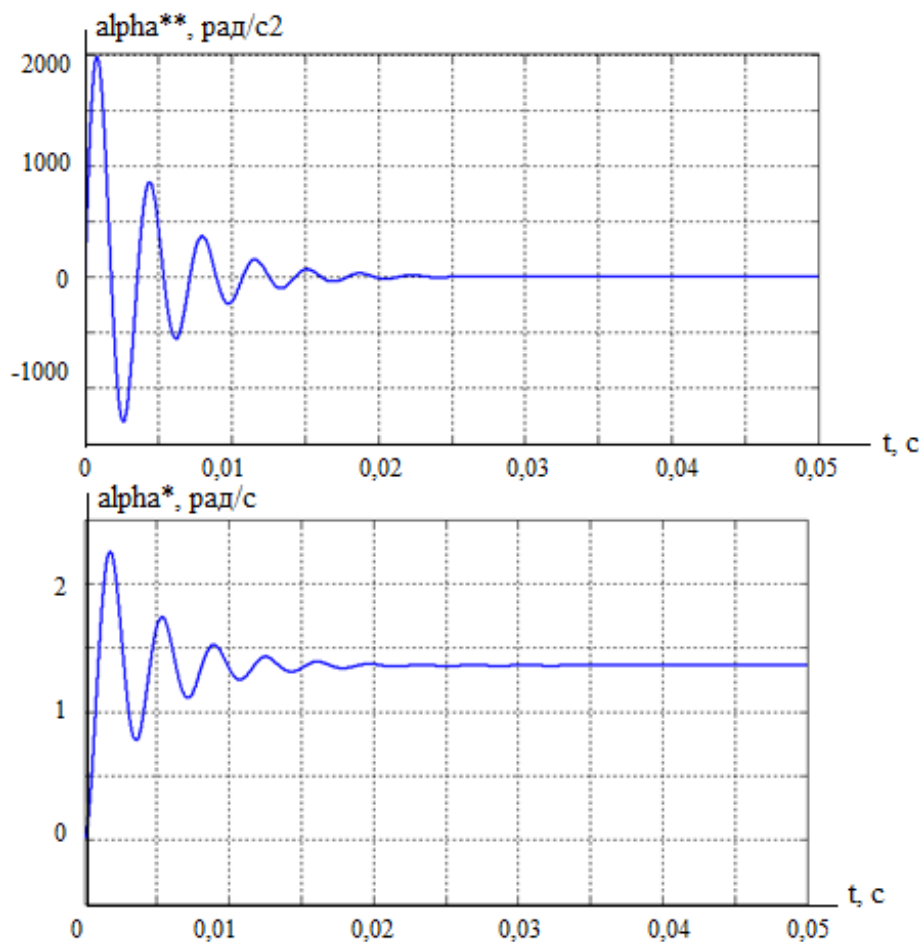
*Signal Builder, Sine Wave, Step* – блоки задания законов изменения угловой скорости в виде трапеции, синусоиды и единичной ступени соответственно;

*Motor* – модель системы «вентильный двигатель – платформа одноосного ИС»;

*A\_tan, A\_cs* – модели акселерометров, измеряющих тангенциальное и центростремительное ускорение соответственно.

Алгоритм интегрирования и параметры моделирования были выбраны с учетом получения устойчивых и корректных результатов при наименее сложном алгоритме и максимально возможном шаге интегрирования.

Целью моделирования является определение реакции системы на единичное ступенчатое воздействие, т. е. построение переходного процесса системы. Результаты моделирования приведены на рис. 6.



**Рис. 6. Реакция системы на ступенчатое воздействие**

Представленный (см. рис. 6) переходный процесс (по скорости) характеризуется следующими показателями качества:

– время переходного процесса  $t_n \approx 0,03$  с;

– перерегулирование  $\sigma = \frac{y_{\max} - y_{\text{уст}}}{y_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{2,25 - 1,36}{1,36} \cdot 100\% \approx 65\%$ .

Очевидно, что система обладает большим показателем перерегулирования. С точки зрения динамического качества работы системы перерегулирование является недопустимым. Кроме того, колебательный переходный процесс вызывает недопустимо большие динамические нагрузки

на элементы системы. Подавление нежелательных колебаний регулируемой величины в переходном процессе возможно при наличии корректирующего устройства (регулятора).

С целью получения требуемых показателей качества переходного процесса необходимо синтезировать регулятор исполнительного устройства управления угловым движением – двигателя ИС. Схема моделирования ВМ в среде Simulink программы Matlab имеет вид, представленный на рис. 7.

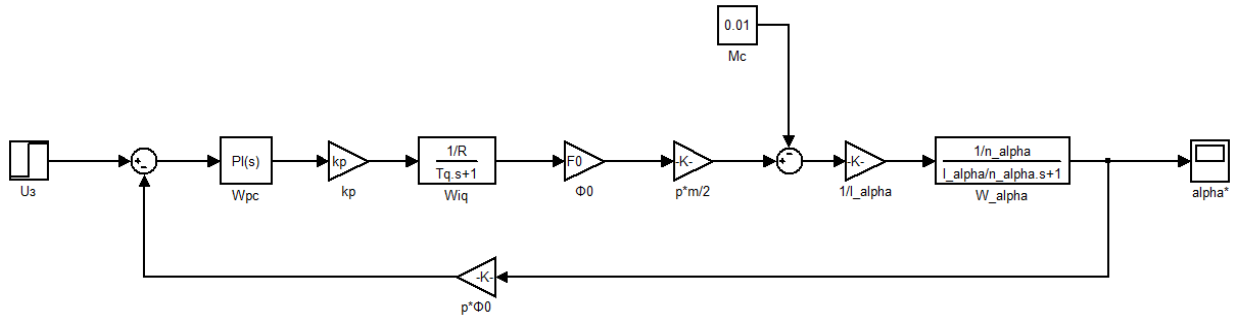


Рис. 7. Схема моделирования ВМ

В состав приведенной схемы входит передаточная функция ПИ-регулятора:

$$W_{PC} = k_{\Pi} + k_{И} \frac{1}{s},$$

где  $k_{\Pi}$  и  $k_{И}$  – коэффициенты усиления П-регулятора и И-регулятора соответственно;  $s$  – комплексная переменная.

Первым этапом выбора параметров ПИ-регулятора является определение области устойчивости данной системы в области параметров  $k_{\Pi}$ ,  $k_{И}$  регулятора. Для построения областей устойчивости был использован критерий Гурвица. Условия устойчивости системы имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} T_{И} > 0; \\ k_{\Pi} > \frac{T_q T_{\alpha 1}}{T_q + T_{\alpha 1}} k_{И} - \frac{1}{k_{PC}} \end{aligned} \right\}$$

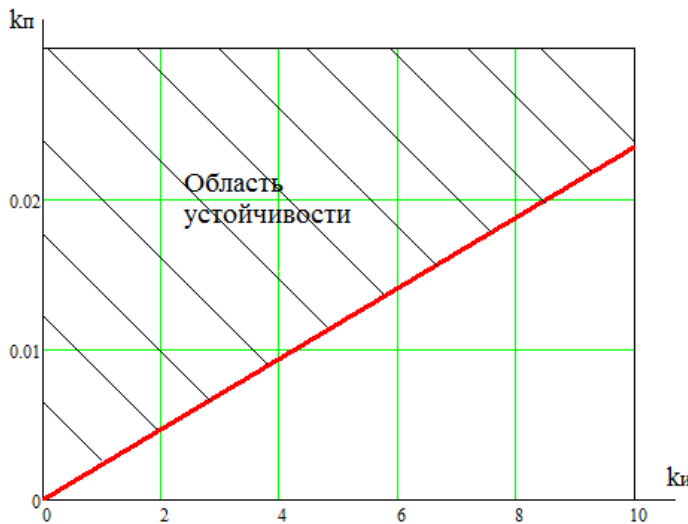


Рис. 8. Область устойчивости системы

Область устойчивости системы представлена на рис. 8.

После того, как известна область устойчивости системы, встает задача определения оптимальных параметров регулятора. Оптимальной системой автоматического регулирования или управления является система, которой тем или иным способом приданы наилучшие качества согласно определенному критерию. Следовательно, система является оптимальной, если оптимальны параметры регулятора, входящего в состав системы.

Стоит отметить, что методы оптимизации для нахождения параметров регулятора по своей сути аналогичны методам идентификации параметров

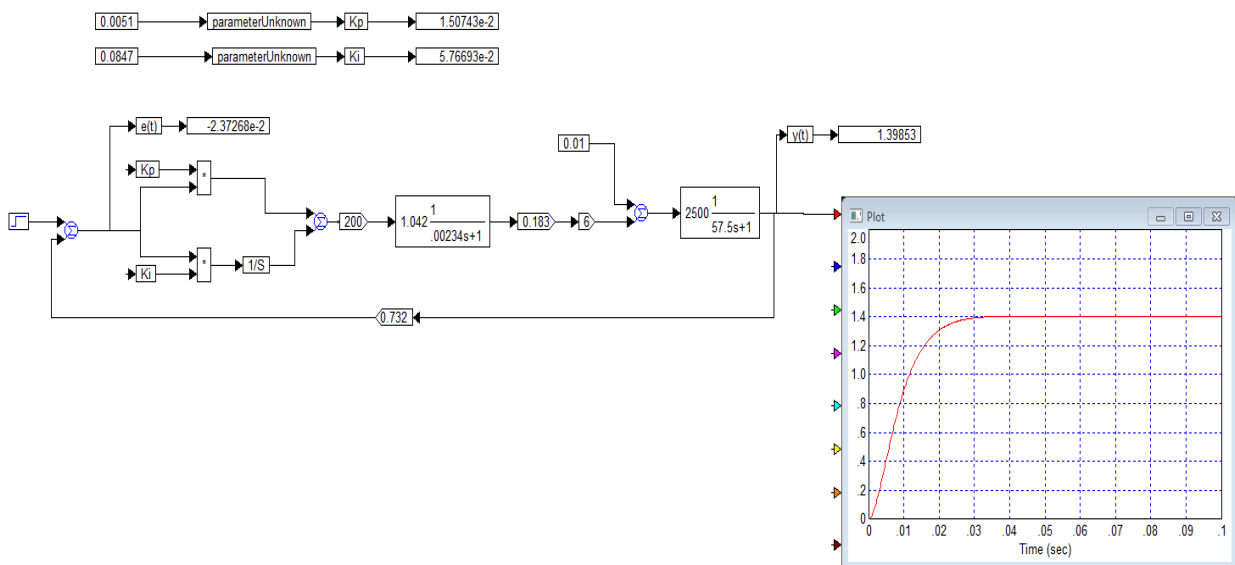
объекта. В первую очередь выбирается критерий минимизации – определенный показатель качества или комплексный критерий, составленный из нескольких показателей с различными весовыми коэффициентами. Далее критерий минимизации дополняется ограничениями, накладываемыми требованиями робастности. В результате получается целевая функция, зависящая от параметров регулятора. Искомые параметры определяются численными методами минимизации це-

левой функции с заданными ограничениями. Методы оптимизации являются мощным средством настройки ПИ-регуляторов с помощью специально разработанных для этого компьютерных программ, например VisSim.

Перед выполнением оптимизации системы необходимо выбрать определенный функционал качества целевой функции системы. Чаще всего в качестве целевой функции задается интегральный квадратичный функционал:

$$J = \int_0^{\infty} \left( \frac{y(t) - y_{уст}}{y_{уст}} \right)^2 dt .$$

При проведении оптимизации системы был использован метод Powell, максимальное количество итераций – 100. Результаты проведения оптимизации приведены на рис. 9.



**Рис. 9. Система с оптимизированными параметрами ПИ-регулятора**

По результатам оптимизации параметрам ПИ-регулятора были присвоены следующие значения:  $k_P = 0,015$ ,  $k_I = 0,0058$ .

За счет оптимизации параметров ПИ-регулятора удалось значительно уменьшить величину перегуливания:

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y_{уст}}{y_{уст}} \cdot 100 \% = \frac{1,46 - 1,36}{1,36} 100 \% \approx 7,4 \% ,$$

что является приемлемым для проектируемой системы.

Таким образом, данное исследование позволит при разработке двух- или трехосных испытательных стендов выбрать параметры регуляторов соответствующих сепаратных каналов автоматического управления угловым движением.

### **Заключение**

В данной работе была предложена конструктивная схема одноосного стенда для испытаний гироскопических систем.

В соответствии с выбранной функционально-кинематической схемой и желаемыми законами движения составлена математическая модель ИС, определены передаточные функции элементов системы управления и построена структурная схема системы автоматического управления ИС. Проведено численное моделирование углового движения одноосного ИС в среде Matlab и получены показатели качества переходного процесса при единичном ступенчатом воздействии. Выбран регулятор системы управления и определены его оптимальные параметры с использованием программы VisSim. Выполнено моделирование различных режимов работы стенда с оптимальным регулятором системы управления угловым движением.



---

*Литература*

1. Герман-Галкин, С.Г. *Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин.* – СПб.: Корона-Век, 2008. – 368 с.
2. *Прецизионные управляемые стенды для динамических испытаний гироскопических приборов / Д.М. Калихман; под общ. ред. акад. В.Г. Пешехонова – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. – 296 с.*

**Седышев Вячеслав Викторович**, канд. техн. наук, заведующий кафедрой приборостроения, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); sed\_v\_v@mail.ru.

**Белочкин Павел Евгеньевич**, магистрант кафедры приборостроения, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); paul-7491@mail.ru.

*Поступила в редакцию 11 июля 2014 г.*

---

**Bulletin of the South Ural State University**  
**Series “Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics”**  
**2014, vol. 14, no. 4, pp. 42–50**

---

## **ANGULAR MOVEMENT CONTROL OF SINGLE-AXIS TEST DESK OF GYRO-SYSTEMS**

**V.V. Sedyshev**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
sed\_v\_v@mail.ru,

**P.E. Belochkin**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
paul-7491@mail.ru

The paper presents design issues of a single-axis stand for testing of gyro devices and systems. Required accuracy of angular velocity is implemented using the inertial sensors (accelerometers) in the system of work platform control of the test stand. Mathematical model is developed for selected kinematic scheme. Block diagram of control object is determined. Design of the single-axis test stand on basis of BLDC motor is proposed. Main structural components of developed design are described. Compensating device (regulator) is selected on basis of analyzing of the algorithms of angular movement automatic control. Method of regulator adjustment in optimization mode of VisSim is investigated. Ability of obtaining of required transient process characteristics by means of PI controller is justified. Modeling of a system with synthesized regulator is carried out. It is noted the possibility to apply the results for determining the regulator parameters of separate channels of biaxial and triaxial test desks.

*Keywords: test desk, automatic control, parameter optimization, numerical modeling.*

### **References**

1. German-Galkin S.G. *Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK* [Designing of Mechatronic Systems on PC]. St. Petersburg, Korona-Vek Publ., 2008. 368 p.
2. Kalikhman D.M. *Pretsizionnye upravlyaemye stendy dlya dinamicheskikh ispytaniy giroskopicheskikh priborov* [Precision Controlled Stands for Dynamic Tests of Gyroscopic Devices]. St. Petersburg, SRC RF CSRI Elektropribor, 2008. 296 p.

*Received 11 July 2014*