

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОДНООСНОГО ИГС НА БАЗЕ ММГ

### MATHEMATICAL MODEL OF A SINGLE-AXIS STABILIZER BASED ON MEMS

**Аннотация:** В работе рассматривается синтез контура одноосного гиросtabilизатора (ГС). В ходе работы описан принцип действия ГС, разработана математическая модель. Подобраны оптимальные параметры, проведено моделирование контура стабилизации.

**Ключевые слова:** гиросtabilизатор, стабилизация, платформа, угловая скорость, ЛАХ, ЛФХ

**Abstract:** This work discusses the synthesis of the contour of a uniaxial gyrostabilizer (GS). In the course of the work, the principle of operation of the GS was described and a mathematical model was developed. The optimal parameters were selected and the stabilization circuit was simulated.

**Key words:** gyrostabilizer, stabilization, platform, angular velocity

#### **Введение:**

##### **Актуальность проблемы:**

На борту летательных аппаратов (ЛА) для стабилизации полезной нагрузки (фото- и видеокамеры, прицельные устройства и др.) применяются гиросtabilизаторы. Которые выполняют сразу ряд функций таких как:

1. Стабилизация изображения: Гиросtabilизаторы помогают поддерживать камеру в стабильном положении, что обеспечивает более четкое и качественное изображение без дрожания или размытия.
2. Уменьшение риска повреждений: Гиросtabilизаторы помогают предотвратить повреждения оптической аппаратуры во время полета за счет минимизации вибраций и ударов, что повышает надежность и продолжительность службы оборудования.
3. Расширение возможностей съемки: Стабильная оптическая аппаратура позволяет операторам получать более гибкий контроль над ракурсами и кадрированием.

#### **Анализ литературы:**

Существуют различные варианты исполнения одноосного гиросtabilизатора.

##### **Механические гиросtabilизаторы:**

Принцип работы: основаны на вращении маховика или гироскопа с высокой угловой скоростью. Эти гироскопы создают силу, которая противодействует изменениям ориентации в пространстве, стабилизируя объект.

##### **Недостатки:**

Большие размеры и вес, особенно при использовании маховиков с высокой инерцией.  
 Механическое изнашивание элементов, требующее регулярного обслуживания.  
 Энергозатратность из-за необходимости поддержания высокой скорости вращения.

Электронные гиросtabilизаторы:

Принцип работы: используют электронные датчики и акселерометры для определения угловых отклонений и вычисления необходимых корректировок. Гироскопы в таких системах могут быть как механическими, так и оптическими.

Недостатки:

Может быть зависимость от внешних факторов, таких как магнитные поля.  
 Иногда сложная калибровка и чувствительность к температурным колебаниям.

### Материалы и методы:

Гиросtabilизаторы на основе микромеханических гироскопов (MEMS):

Принцип работы: используют миниатюрные механические элементы (например, подвесные микроструктуры), которые могут изменять свои характеристики при воздействии угловых ускорений. Они способны отслеживать вращение и ориентацию объекта.

Преимущества:

Компактность и малый вес — MEMS-гироскопы очень малы и легки, что делает их идеальными для применения в мобильных устройствах, носимых гаджетах, а также для точных измерений и стабилизации в миниатюрных системах.

Низкое энергопотребление — благодаря своей малой мощности и высокой эффективности, такие гироскопы потребляют значительно меньше энергии по сравнению с механическими гироскопами.

Высокая точность и стабильность — MEMS-гироскопы обладают хорошей стабильностью и могут обеспечить высокую точность при стабильных условиях.

Низкие затраты — изготовление MEMS-гироскопов может быть дешевым благодаря использованию массового производства на основе полупроводниковых технологий.

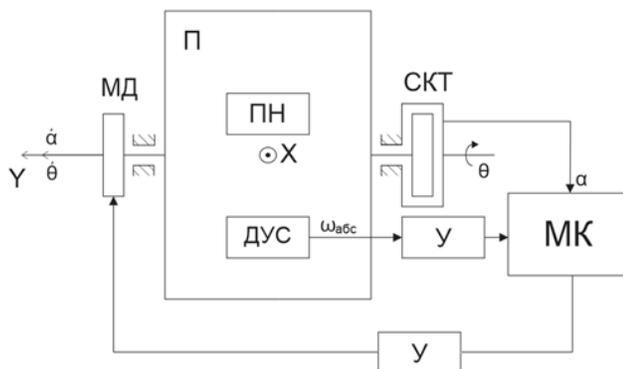


Рисунок 1 - Кинематическая схема гиросtabilизатора

Кинематическая схема представляет собой платформу (П), на которой установлены ММГ(ДУС) и полезная нагрузка (ПН) в виде видеокамеры, Моментный двигатель (МД) и датчик угла (СКТ), установленные на полуосях. А также усилители (У) с микроконтроллером (МК).

Платформа имеет одну степень свободы по оси Y, относительно которой ЛА движется с угловой скоростью  $\dot{\theta}$ . Микромеханический гироскоп выдает информацию об абсолютной угловой скорости ( $\omega_{abs} = \dot{\theta} + \dot{\alpha}$ , где  $\dot{\alpha}$  — угловая скорость платформы относительно ЛА). Микроконтроллер выдает напряжение, пропорциональное измеренной угловой скорости,

которое после усиления поступает на МД, который начинает вращать платформу с угловой скоростью  $\dot{\theta}$ , но направленной противоположно.

Для составления математической модели ГС необходимо записать его уравнения.

$$M_{Y_{II}} + M_{CM} + M_B = 0, \quad (1)$$

где  $M_{Y_{II}} = -A(\ddot{\alpha} + \ddot{\theta})$  - инерционный момент относительно платформы;  $M_{CM} = qC_m i_{CM}$ ;  $M_B$  - возмущающий момент. Добавим уравнение двигателя и перепишем уравнение (1) в виде:

$$-A(\ddot{\alpha} + \ddot{\theta}) + qC_m i_{CM} + M_B = 0;$$

$$L \frac{di_{cm}}{dt} + i_{cm} R_{cm} + qC_E \dot{\alpha} = U_{cm}. \quad (2)$$

где  $A$  - момент инерции оси  $Y$ ;  $q$  - передаточное число редуктора;  $U_{cm}$  - напряжение стабилизирующего мотора ( $U_{cm} = -K\omega_{abc}$ );  $K = K_1 + \frac{K_2}{p}$  - коэффициент усиления усилителя;  $C_m$ ,  $C_E$  - коэффициенты момента и противо-ЭДС МД;  $I$  - ток МД;  $L$ ,  $R$  - индуктивность и активное сопротивление обмотки МД.

Запишем уравнения (2) в операторах Лапласа

$$-A_1 \dot{\alpha}_1(p)p + qC_m i_{CM}(p) + M = 0; \quad (2)$$

$$\left(\frac{L}{R}p + 1\right) i_{cm}(p) + \frac{qC_E \dot{\alpha}(p)}{R} = -\frac{K(\dot{\theta} + \dot{\alpha})}{R}(p)$$

$$T = \frac{L}{R} - \text{электромагнитная постоянная времени}$$

Принимаем  $L = 0$ ,  $\dot{\theta} = const$  раскроем уравнения (2)

$$-A\dot{\alpha}(p)p - \frac{q^2 C_m C_E}{R} \dot{\alpha}(p) - \frac{qC_m K}{R} (\dot{\theta} + \dot{\alpha})(p) + M = 0; \quad (3)$$

Составим блок схему по уравнению (3)

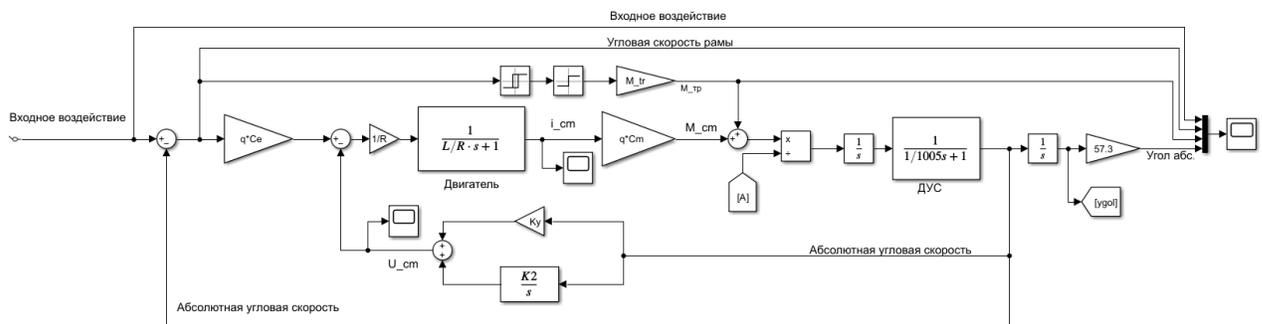


Рисунок 2 - Математическая модель

На мат. модели (рис. 2), возмущающий момент ( $M$ ) представляем в виде  $M = -M_0 \text{sign}(\dot{\alpha})$ , ( $M_0 = 0.01 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ). Датчик угловой скорости имеет полосу пропускания 160 Гц, поэтому он представлен апериодическим звеном с постоянной времени  $1/1005 \text{ с}$ , где  $1005 = 2 \cdot \pi \cdot 160 \text{ Гц}$ .

Моментный двигатель оси (Электродвигатель ЗДБМ 70-0,16-3-3), обычно используется без редуктора, поэтому для синтеза контура стабилизации примем  $q = 1$ .

При  $L = 0$  передаточная функция системы будет иметь вид:

$$W_{\alpha_{abc}/\dot{\theta}} = \frac{a}{A_1 p^2 + (S_1 + a)p + S_2}, \text{ где}$$

$$a = \frac{C_m C_e q^2}{R}; S_1 = \frac{C_m K_1 q}{R}; S_2 = \frac{C_m K_2 q}{R};$$

$$S_2 = \frac{A_1}{T^2}; S_1 = S_2 2T\xi - a;$$

Примем  $t_p = 0.25, \xi = 1$

$$\text{Тогда } T = \frac{t_p}{3} = 0.083;$$

Находим из уравнений ()  $K_2, K_1, S_1, S_2$ ;

$$K_1 = 8.68; K_2 = 44.54;$$

$$S_1 = 0.24; S_2 = 1.47;$$

Запишем передаточную функцию разомкнутой системы по входному воздействию и по возмущению, при  $L = const, M_B = const$ .

$$W_{\alpha_{abc}/\psi}(p) = \frac{\frac{1}{R} C_e C_m q^2}{A_1 T p^2 + A_1 p + \frac{1}{R} C_m K_1 q p + \frac{1}{R} C_m K_2 q}$$

$$W_{\alpha_{abc}/M_B} = \frac{(Tp + 1)}{A_1 T p^2 + A_1 p + \frac{1}{R} C_m K_1 q p + \frac{1}{R} C_m K_2 q}$$

По данным передаточным функция построим ЛАХ и ЛФХ системы.

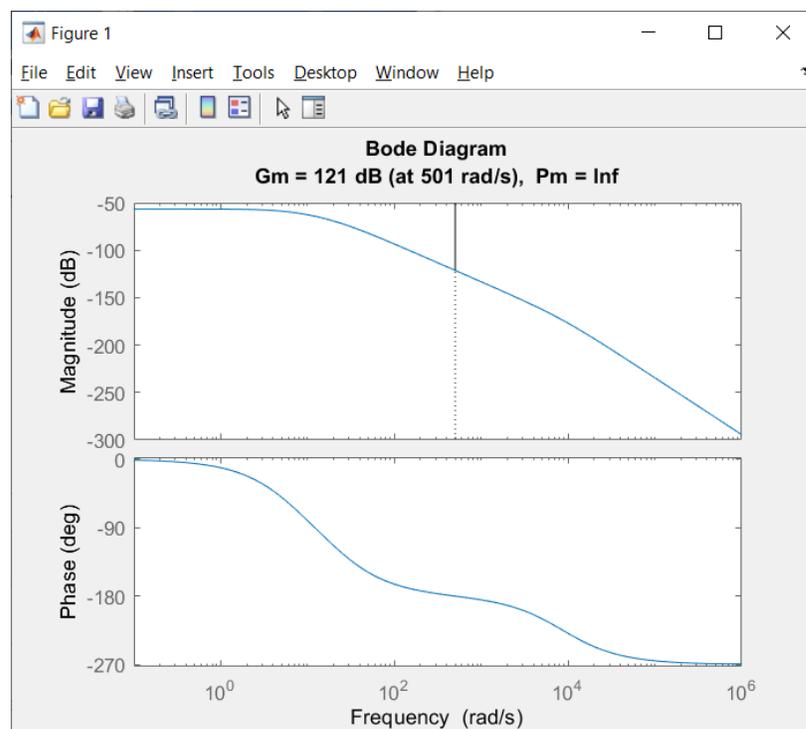


Рисунок 4 ЛАХ, ЛФХ системы  $W_{\alpha_{abc}/\dot{\theta}}$  при выбранных параметрах(Matlab)

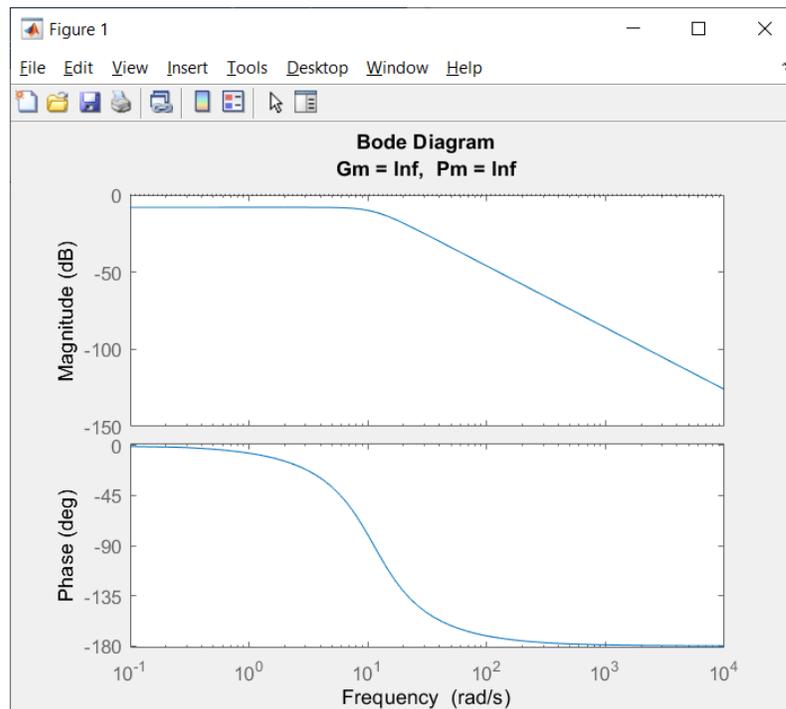


Рисунок 5 - ЛАХ, ЛФХ  $W_{a_{abc}/M_B}$  при выбранных параметрах (Matlab)

Из (рис.4) и (рис.5) делаем вывод, что система устойчива при выбранных параметрах.

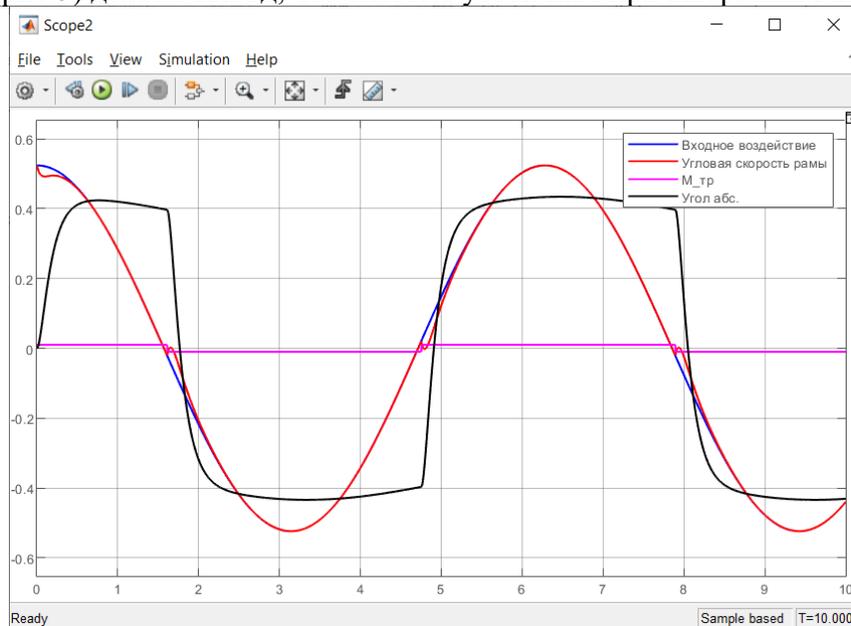


Рисунок 6 - График угла на синусоидальное воздействие при выбранных параметрах (Matlab/Simulink)

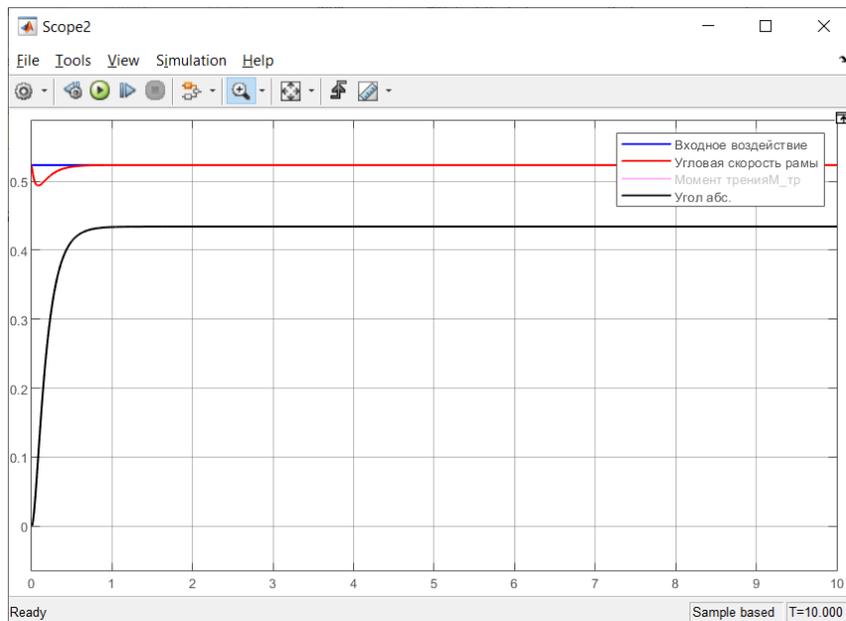


Рисунок 7 – График угла на единичный скачок

Стабилизация угла не превышает 0.5 градусов. Амплитуда колебаний угла, объясняется тем, что при наличии внешнего возмущающего момента, в числителе функции  $W_{a_{abc}/M_B}$  будет

стоять выражение  $\frac{M_1}{S_2}$ , для выбранных параметров значение выражение будет равняться 0.0068

радиан, при переводе из радиан в градусы значение будет 0.39 градусов, которое определяет значение асимптоты колебаний угла, что видно на рис.(6). Коэффициент  $K_2$  необходим для устранения ухода гироскопа, так как присутствует ошибка  $\Delta\omega = \dot{\theta} - \dot{\alpha}$  (рис.8).

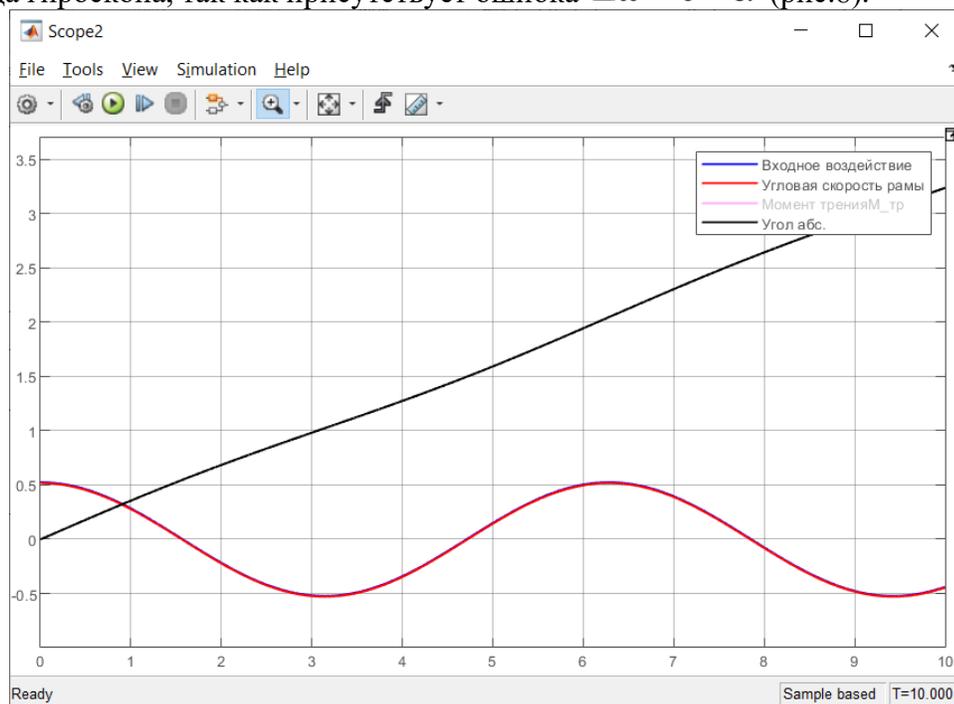


Рисунок 8 - График угла без интегрирующего коэффициента усиления

**Обсуждения:** рассмотренная математическая модель имеет одну степень свободы, основным чувствительным элементом является ММГ, который передает значение текущей угловой скорости на микроконтроллер, который отвечает за логику работы гиросtabilизатора.

В данном приборе может быть предусмотрено несколько режимов работ:

- 1) Арретир
- 2) Стабилизация
- 3) Режим низкого энергопотребления

За переключение между ними отвечает микроконтроллер.

Несмотря на все достоинства такого чувствительного элемента как ММГ, нельзя не осветить также и его недостатки:

Чувствительность к шумам и помехам — такие системы могут быть чувствительны к внешним вибрациям и электромагнитным помехам.

Низкая точность в условиях длительных временных интервалов — при длительном использовании может возникать накапливающаяся погрешность, требующая калибровки.

Однако преимущества, которые дают ММГ, а именно обеспечивают отличное сочетание компактности, точности и энергоэффективности, что делает их идеальными для применения в современных мобильных и миниатюрных устройствах

### **Результаты:**

Таким образом промоделирована работа одного из контуров стабилизации ГС на базе ММГ. Выбраны оптимальные коэффициенты усиления, при которых работа системы становится устойчивой.

Данную математическую модель можно использовать также для создания как двух, так и трехосных гиросtabilизаторов.

## Библиографический список

1. ТГ-18 // Лаборатория микроприборов URL: <https://mp-lab.ru/products/uglovye-dus/tg-18/> (дата обращения: 29.11.24).
2. Лысов А.Н., Лысова А.А. Теория гироскопических стабилизаторов. - Челябинск: 2009. - 117 с.
3. Логарифмическая амплитудная-частотная характеристика (лах) и фазовая-частотная характеристика (лфх) // Studfile URL: <https://studfile.net/preview/997977/page:4/> (дата обращения: 29.11.24).
4. В.В. Серегин. Прикладная теория и принципы построения гироскопических систем: учебное пособие. – СПб.: ИТМО, 2007. – 78 стр.
5. МЭМСы. Как устроены современные датчики // Habr URL: <https://habr.com/ru/companies/milandr/articles/532662/> (дата обращения: 29.11.24).