

УДК.551.383

Система стабилизации полезной нагрузки на динамически настраиваемом гироскопе

Малютин Д.М.

Тульский государственный университет,
пр. Ленина, 92, 300000, г. Тула, Россия

Поступила 08.02.2016

Принята к печати 25.04.2016

В настоящее время широко распространены системы стабилизации полезной нагрузки на основе трехстепенных астатических гироскопов и гироскопов на сферической шарикоподшипниковой опоре. Точность и ресурс работы таких систем требуют увеличения. Эта задача может быть решена путем использования в качестве чувствительного элемента динамически настраиваемого гироскопа (ДНГ). На сегодняшний день вопрос достижения потенциально возможных метрологических характеристик систем стабилизации на ДНГ не является полностью решенным. Его решение требует в том числе разработки математической модели, отличающейся от известных подробным описанием возмущений, действующих на прибор при трехкомпонентной качке основания. Кроме того, необходима разработка структур усилительно-преобразующих трактов контуров стабилизации систем стабилизации на ДНГ, обеспечивающих повышение точности и помехозащищенности системы с учетом вариативности вида передаточной функции ДНГ на низких частотах при изменении условий функционирования, что являлось целью работы. В работе с использованием уравнений Эйлера получена полная математическая модель функционирования системы при трехкомпонентной качке основания, подробно учитывающая возмущения, действующие на прибор. Рассмотрены особенности математического описания ДНГ, выявлены частоты преобладающих составляющих шума в выходном сигнале гироскопа и с учетом этого разработана схема усилительно преобразующего тракта контуров стабилизации, обеспечивающая увеличение точности стабилизации на низких частотах и отсутствие систематического дрейфа системы стабилизации от действия постоянных возмущающих моментов по оси стабилизации. Проведенные динамические расчеты доказывают возможность обеспечения амплитуды погрешности стабилизации не более $0,0042^\circ$ при трехкомпонентной качке основания.

Ключевые слова: система стабилизации, гироскоп, погрешность стабилизации.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-32-40

Адрес для переписки:

Малютин Д.М.,
Тульский государственный университет,
пр. Ленина, 92, 300000, г. Тула, Россия
e-mail: MalyutinDM@yandex.ru

Address for correspondence:

Malyutin D.M.,
Tula state University,
Lenin Ave., 92, 300000, Tula, Russia
e-mail: MalyutinDM@yandex.ru

Для цитирования:

Малютин Д.М.
Система стабилизации полезной нагрузки на динамически настраиваемом гироскопе. Приборы и методы измерений. 2016. – Т. 7, № 1. – С. 32–40.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-32-40

For citation:

Malyutin D.M.
[The stabilization system on payload built on a dynamically tuned gyroscope].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements]. 2016, vol. 7, no. 1, pp. 32–40 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-32-40

Введение

Системы стабилизации (СС) широко применяются как основа информационно-измерительных и управляющих систем подвижных объектов. СС используются для получения сигналов, пропорциональных угловым отклонениям подвижных объектов в пространстве. Эти сигналы поступают в автопилот подвижного объекта. Кроме того, СС используются для стабилизации и управления различной аппаратурой на борту подвижных объектов [1–4]. Разработкой подобных систем активно занимаются такие фирмы и организации, как казенное предприятие ЦКБ «АРСЕНАЛ», ОАО НПК Киевский завод автоматики имени Г.И. Петровского (Украина); фирмы «Singer Corporation», «Northrop Grumman Corporation», «Litton Industries» (США); ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Мичуринский завод «Прогресс», ОАО ПНППК (Россия) и др. Анализ технических характеристик существующих СС показал, что большое количество СС (например, ГС – 15М, ГС – 25, С – 16 и др.) строятся на трехступенных астатических гироскопах с внешним кардановым подвесом или гироскопах на сферической шарикоподшипниковой опоре (типа МГТУ или Д-7). Точность и ресурс работы таких систем требуют увеличения. Задача повышения точности и увеличения ресурса СС может быть решена путем использования в качестве чувствительного элемента динамически настраиваемого гироскопа (ДНГ), поскольку точность системы определяется как точностью контуров стабилизации, обеспечивающих совмещение платформы с опорной системой координат, так и точностью самой опорной системы, где гироскоп играет роль чувствительного элемента, моделирующего опорную систему координат.

ДНГ имеет ряд преимуществ по сравнению с трехступенными астатическими гироскопами с внешним кардановым подвесом или гироскопами на сферической шарикоподшипниковой опоре:

1. Высокие точностные характеристики. Если собственный уход трехступенного астатического гироскопа с внешним кардановым подвесом или гироскопа на сферической шарикоподшипниковой опоре составляет несколько десятков град/с, то у ДНГ (в зависимости от типа) составляет несколько единиц и даже десятых долей град/с.

2. Технологичность конструкции, малое число функциональных элементов и, следовательно,

но, большой ресурс и повышенную надежность. Если ресурс трехступенного астатического гироскопа с внешним кардановым подвесом или гироскопа на сферической шарикоподшипниковой опоре составляет несколько сотен часов, то у ДНГ составляет десять тысяч часов.

3. Возможность функционирования в широком диапазоне температур и перегрузок при малом времени готовности. Если время готовности трехступенного астатического гироскопа с внешним кардановым подвесом составляет 120 с, то время готовности ДНГ составляет 3 с.

4. Малую потребляемую мощность.

5. Рациональное использование внутреннего объема (благодаря наличию внутреннего карданова подвеса), обеспечивающее малые габаритные размеры и массу ДНГ. Если габаритные размеры гироскопа МГТУ-М составляют 59×50 мм, а масса 400 г, то габаритные размеры ДНГ-4 составляют 26×34 мм, а масса 80 г.

6. Большое расстояние между приводом и чувствительным элементом – ротором, а следовательно, малое влияние тепловыделения в приводе на точность ДНГ [5–7].

К недостаткам СС на ДНГ можно отнести вариативность вида передаточной функции ДНГ на низких частотах при изменении условий функционирования, что затрудняет построение контуров стабилизации прибора. Также недостатком СС на ДНГ является низкая помехозащищенность усилительно преобразующего тракта (УПТ) в контурах стабилизации в результате наличия в выходном сигнале ДНГ квадратурных составляющих.

На сегодняшний день вопрос достижения потенциально возможных метрологических характеристик СС на ДНГ не является полностью решенным. Его решение требует в том числе разработки математической модели, отличающейся от известных [7–9] подробным описанием возмущений, действующих на прибор при трехкомпонентной качке основания. Кроме того, необходима разработка структур построения УПТ контуров стабилизации СС на ДНГ, обеспечивающих повышение точности и помехозащищенности системы с учетом вариативности вида передаточной функции ДНГ на низких частотах при изменении условий функционирования. Необходимо проведение динамических расчетов функционирования системы. Решение указанных проблем являлось целью данной работы.

Математическое описание системы стабилизации на динамически настраиваемом гироскопе

В процессе работы с использованием уравнений Эйлера получена математическая модель системы стабилизации на ДНГ. Без учета моментов, изменяющихся с удвоенной частотой вращения вала и вызывающих малые колебания ротора на этой частоте, в режиме динамической настройки $(A_1 + B_1 - C_1)\dot{\varphi}_o - (k_\alpha + k_\beta) = 0$ эти уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned}
 & (J_y \cos^2 \varphi_z + J_x \sin^2 \varphi_z + J_{y1}) \ddot{\omega}_{y2} / \cos \varphi_z + b_1 \dot{\omega}_{y2} / \cos \varphi_z - \\
 & - M_{ds1} = -(J_x - J_z) \omega_{z2} \omega_{x2} \cos \varphi_z - (J_z - J_y) \omega_{z2} \omega_{y2} \sin \varphi_z + \\
 & + M_{bh1} + b_1 \dot{\omega}_{oy} - b_1 (\omega_{ox} \cos \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z - \omega_{oz} \sin \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z) - \\
 & - J_{y1} (\omega_{z2} - \omega_{z1}) (\omega_{ox} \cos \varphi_y - \omega_{oz} \sin \varphi_y) - (J_{x1} - J_{z1}) \omega_{x1} \omega_{z1} - \\
 & - (J_x + J_{y1}) \dot{\omega}_{x1} \operatorname{tg} \varphi_z - (J_x + J_{y1}) (\omega_{z2} - \omega_{z1}) (\omega_{x2} \operatorname{tg} \varphi_z \sin \varphi_z + \\
 & + \omega_{y2} \sin \varphi_z); \\
 & J_z \ddot{\omega}_{z2} + b_2 \dot{\omega}_{z2} - M_{ds2} = M_{bh2} - b_2 (-\omega_{oz} \cos \varphi_y - \omega_{ox} \sin \varphi_y) - \\
 & - (J_y - J_x) \omega_{y2} \omega_{x2}; \\
 & (A + 0,5B_1) \ddot{\alpha}_g + 0,5(D_\alpha + D_\beta) \dot{\alpha}_g + (C + B_1) \dot{\varphi}_o \dot{\beta}_g + 0,5(D_\alpha + \\
 & + D_\beta + M_{z3}^0) \dot{\varphi}_o \dot{\beta}_g + 0,5(C_1 - A_1) \dot{\varphi}_o \omega_{x2} \alpha_g = 0,5(-C_1 + B_1 + \\
 & + A_1) \dot{\varphi}_o \omega_{z2} + M_{y3}^{b.s.} + M_{y3}^{b.s.} \cos \varphi + M_{x3}^{b.s.} \sin \varphi; \\
 & (A + 0,5B_1) \ddot{\beta}_g + 0,5(D_\alpha + D_\beta) \dot{\beta}_g - (C + B_1) \dot{\varphi}_o \dot{\alpha}_g - 0,5(D_\alpha + \\
 & + D_\beta + M_{z3}^0) \dot{\varphi}_o \dot{\alpha}_g - 0,5(C_1 - A_1) \dot{\varphi}_o \omega_{x2} \beta_g = 0,5(C_1 - B_1 - \\
 & - A_1) \dot{\varphi}_o \omega_{y2} + M_{y3}^{b.s.} + M_{y3}^{b.s.} \sin \varphi - M_{x3}^{b.s.} \cos \varphi; \\
 & T_{ds1} M_{ds1} p + M_{ds1} = K_{ds1} U_1 W_{kz1}(p); \\
 & T_{ds2} M_{ds2} p + M_{ds2} = K_{ds2} U_2 W_{kz2}(p); \\
 & U_1 = K_{dy1} \dot{\alpha}_g; \\
 & U_2 = K_{dy2} \dot{\beta}_g; \\
 & \dot{\varphi}_z = \omega_{z2} - \omega_{z1} = \omega_{z2} - \omega_{oz} \cos \varphi_y - \omega_{ox} \sin \varphi_y; \\
 & \dot{\varphi}_y = \omega_{y2} / \cos \varphi_z + \omega_{ox} \cos \varphi_z \operatorname{tg} \varphi_z - \omega_{oy} - \omega_{oz} \sin \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z; \\
 & \omega_{z1} = \omega_{oz} \cos \varphi_y + \omega_{ox} \sin \varphi_y; \\
 & \omega_{x1} = \omega_{ox} \cos \varphi_y - \omega_{oz} \sin \varphi_y; \\
 & \omega_{x2} = \omega_{ox} \frac{\cos \varphi_y}{\cos \varphi_z} - \omega_{oz} \frac{\sin \varphi_y}{\cos \varphi_z} + \omega_{y2} \operatorname{tg} \varphi_z; \\
 & \dot{\alpha}_g \approx \omega_{y2} + \dot{\alpha}_g; \\
 & \dot{\beta}_g \approx \omega_{z2} + \dot{\beta}_g;
 \end{aligned}$$

где A_1, B_1, C_1 – моменты инерции кольца подвеса относительно главных осей инерции;
 A, B, C – моменты инерции ротора относительно главных осей инерции;

- $\dot{\varphi}_o$ – угловая скорость вращения ротора гироскопа;
- D_α, D_β – удельные моменты демпфирования по осям упругого подвеса;
- k_α, k_β – угловые жесткости по осям упругого подвеса;
- α_g, β_g – углы, определяющие положение ротора относительно корпуса;
- $M_{z3}^0 \dot{\varphi}_o$ – момент аэродинамического сопротивления вращению ротора гироскопа;
- $M_{y3}^{b.s.}$ – прочие моменты внешних сил, действующие вокруг оси oy_3 внутреннего кольца подвеса гироскопа;
- $M_{x3}^{b.s.}$ – прочие моменты внешних сил, действующие вокруг оси ox_3 подвеса ротора;
- $M_\eta^{b.s.}, M_\xi^{b.s.}$ – проекции моментов внешних сил, действующих вокруг осей, связанных с корпусом прибора (магнитоэлектрического датчика момента, магнитного тяжения);
- $W_{kz1}(p), W_{kz2}(p)$ – передаточные функции корректирующих звеньев контуров стабилизации;
- α_g, β_g – абсолютные угловые скорости системы координат, связанной с ротором ДНГ, относительно системы координат связанной с основанием, на котором установлена СС, при малых углах α_g, β_g ;
- $\omega_{z1}, \omega_{x1}, \omega_{y1}$ и $\omega_{z2}, \omega_{x2}, \omega_{y2}$ – значения проекций абсолютной угловой скорости наружной рамы и платформы СС на оси связанных с ними систем координат $x_1 y_1 z_1$ и $x_2 y_2 z_2$ соответственно;
- $\omega_{oz}, \omega_{ox}, \omega_{oy}$ – угловые скорости качки основания относительно соответствующих осей;
- M_{ds1}, M_{ds2} – моменты, развиваемые стабилизирующими двигателями наружной рамы и внутренней рамы соответственно;
- M_{bh1}, M_{bh2} – возмущающие моменты по осям наружной и внутренней рамы СС соответственно, включая моменты сил сухого трения;
- J_x, J_y, J_z – моменты инерции платформы СС относительно соответствующих осей;
- J_{x1}, J_{y1}, J_{z1} – моменты инерции наружной рамы СС относительно соответствующих осей;
- b_1, b_2 – удельные моменты сил скоростного трения по осям наружной и внутренней рамы СС соответственно;
- K_{ds1}, K_{ds2} – коэффициенты передачи двигателей стабилизации;
- K_{dy1}, K_{dy2} – коэффициенты передачи датчиков угла ДНГ;
- T_{ds1}, T_{ds2} – постоянные времени двигателей стабилизации;
- φ_y, φ_z – углы отклонения наружной рамки карданова подвеса СС относительно основания и

внутренней рамки карданова подвеса СС относительно наружной рамки карданова подвеса СС; φ – угол поворота ротора гироскопа.

Моменты сил сухого трения (наряду с моментами от несбалансированности M_{nb1} , M_{nb2} и тяжести токоподводов M_{t1} , M_{t2}) являются составляющими моментов M_{bh1} , M_{bh2} , и определяются [8]:

$$M_{ipy} = -M_{ipy0} \text{sign} \dot{\varphi}_y = -M_{ipy0} \text{sign} \left(\omega_{ox} \frac{\cos \varphi_y}{\cos \varphi_z} - \omega_{oz} \frac{\sin \varphi_y}{\cos \varphi_z} + \omega_{y2} \frac{\sin \varphi_z}{\cos \varphi_z} \right) \sin \varphi_z + \omega_{y2} \cos \varphi_z - \omega_{oy} \right), \quad (2)$$

$$M_{ipz} = -M_{ipz0} \text{sign} \dot{\varphi}_z = -M_{ipz0} \text{sign} (\omega_{z2} - \omega_{oz} \cos \varphi_y - \omega_{ox} \sin \varphi_y). \quad (3)$$

Структурная схема СС на динамически настраиваемом гироскопе в режиме стабилизации в соответствии с (1)–(3) представлена на рисунке 1.

На структурной схеме обозначено:
 $A_g = A + 0,5B_1$, $D_g = 0,5(D_\alpha + D_\beta)$, $H = (C + B_1)\dot{\varphi}_0$,
 $A_k = 0,5(A_1 + B_1 - C_1)$, $J_{ny} = J_y \cos^2 \varphi_z + J_x \sin^2 \varphi_z + J_{y1}$.
Действие моментов, обуславливающих прецессию гироскопа, на структурных схемах учтено в виде моментов M_1 , M_2 .

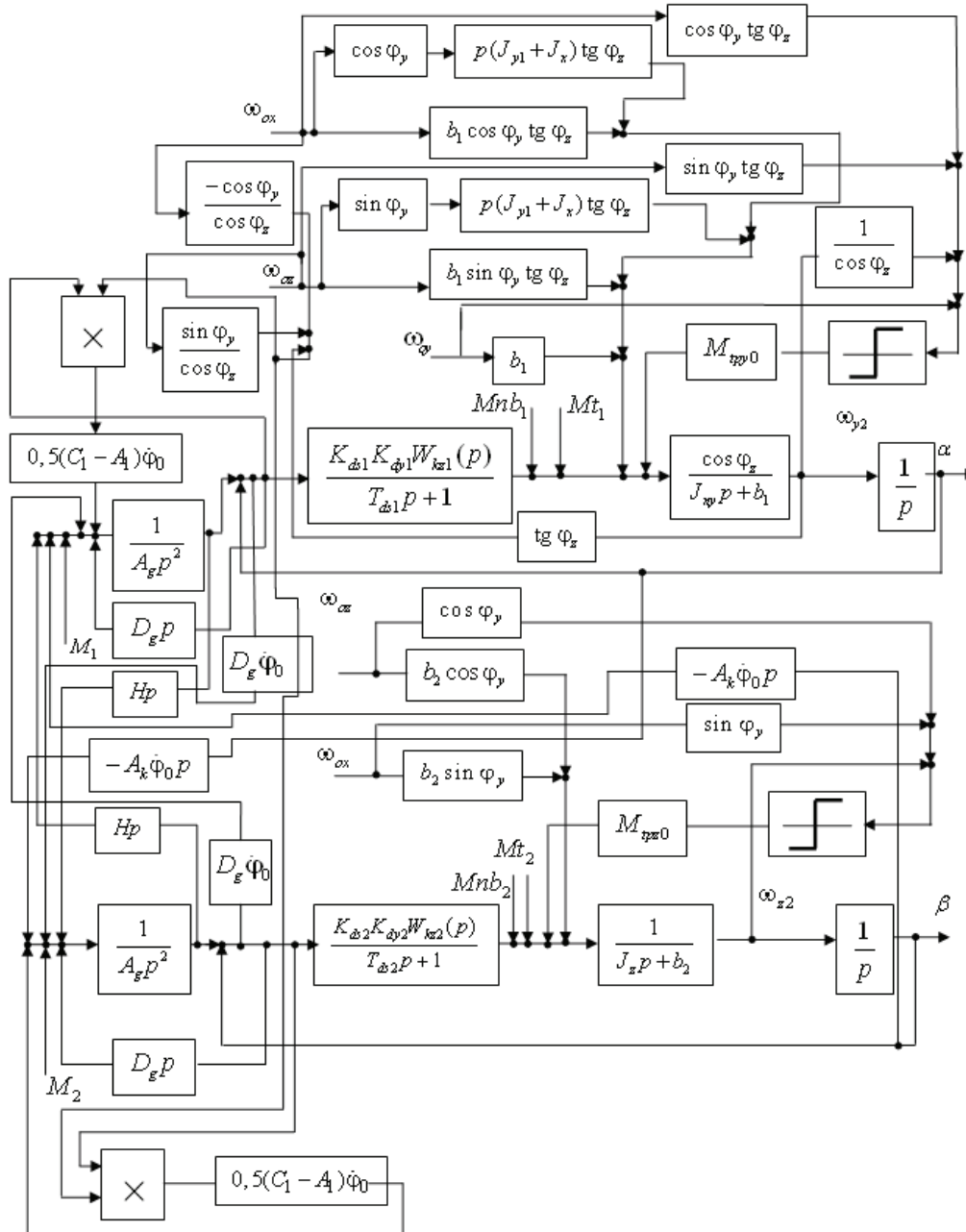


Рисунок 1 – Структурная схема системы стабилизации на динамически настраиваемом гироскопе
Figure 1 – Structural scheme system stabilization on dynamically tuned gyroscope

В зависимости от точности динамической настройки и влияния демпфирования поведение ДНГ на неподвижном основании в области низкочастотных и постоянных возмущающих моментов различно [7].

Если предположить, что условие динамической настройки выполнено, и пренебречь демпфированием, то уравнения ДНГ по форме совпадают с уравнениями трехстепенного свободного гироскопа. Передаточная функция ДНГ по одному из выходов относительно входа – момента, действующего по той же оси, имеет вид:

$$W_g(p) = \frac{A_g p + D_g}{A_g^2 p^2 + D_g p + (H^2 + D_g^2)} \cdot \frac{1}{p}. \quad (4)$$

При точной динамической настройке, но при $k_d = 0,5(D_\alpha + D_\beta)\varphi_0 \neq 0$ передаточная функция ДНГ запишется:

$$W_g(p) = (A_g p^2 + D_g p) / (A_g^2 p^4 + 2A_g D_g p^3 + (H^2 + D_g^2) p^2 + 2Hk_d p + k_d^2). \quad (5)$$

Для случая неточного выполнения условия динамической настройки и при $k_d \neq 0$ передаточная функция ДНГ:

$$W_g(p) = (A_g p^2 + D_g p + k_h) / (A_g^2 p^4 + 2A_g D_g p^3 + (H^2 + D_g^2 + 2A_g k_h) p^2 + (2Hk_d + 2D_g k_h) p + (k_d^2 + k_h^2)), \quad (6)$$

где $(A_1 + B_1 - C_1)\varphi_0 - (k_\alpha + k_\beta) = k_h$.

Усилительно-преобразующий тракт системы стабилизации на динамически настраиваемом гироскопе

В работе предложена структурная схема построения УПТ каналов стабилизации, учитывающая особенности функционирования ДНГ [10]. Двухосная индикаторная СС на ДНГ работает следующим образом. При наличии качки основания возникают возмущающие моменты, стремящиеся изменить первоначальное положение платформы 2 (рисунок 2) и установленного на ней объекта стабилизации 20.

Датчик угла 9 ДНГ 10, формирует сигнал, пропорциональный отклонению платформы 2 по оси наружной рамки 1, который поступает на вход корректирующего звена (КЗ) 8. Разложение в ряд Фурье выходного сигнала ДНГ на неподвижном основании позволяет определить частоты преобладающих составляющих шума выходного сигнала, которые соответствуют частоте вращения ротора

гироскопа, двойной частоте вращения ротора гироскопа и нутационной частоте колебаний ротора.

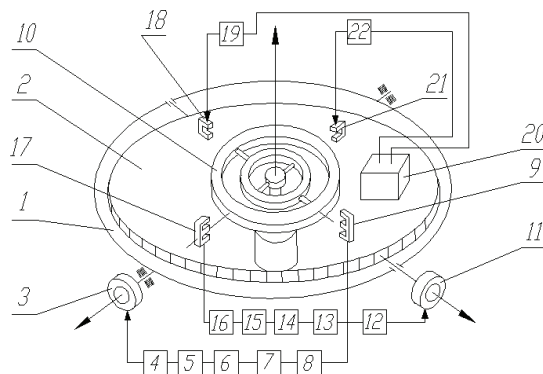


Рисунок 2 – Электрокинематическая схема двухосной системы стабилизации на динамически настраиваемом гироскопе (расшифровка обозначений дается в тексте)

Figure 2 – Kinematic diagram of the biaxial stabilization system on dynamically tuned gyroscope (the symbols are given in the text)

Значения этих частот, найденных в результате эксперимента, использованы для определения постоянных времени КЗ 7, КЗ 6. КЗ 8 реализует передаточную функцию вида $W_1(p) = \frac{(1+T_3 p)}{T p}$,

где T, T_3 – постоянные времени; p – оператор Лапласа. Сигнал с выхода КЗ 8 поступает на вход КЗ 7. КЗ 7 реализует передаточную функцию вида:

$$W_2(p) = \frac{(T_4 p^2 + a_1 p + 1)}{(T_5 p^2 + a_2 p + 1)}, \quad \text{где } T_4, T_5, a_1, a_2 -$$

параметры КЗ 7. Сигнал с выхода КЗ 7 поступает на вход КЗ 6. КЗ 6 реализует передаточную функцию вида:

$$W_3(p) = \frac{(T_6 p^2 + a_3 p + 1)(T_8 p^2 + a_5 p + 1)}{(T_7 p^2 + a_4 p + 1)(T_9 p^2 + a_6 p + 1)},$$

где $T_6, T_7, a_3, a_4, T_8, T_9, a_5, a_6$ – параметры КЗ 6. Сигнал с выхода КЗ 6 поступает на вход КЗ 5. КЗ 5 реализует передаточную функцию вида:

$$W_4(p) = \frac{(1+T_1 p)}{(1+T_2 p)}, \quad \text{где } T_1, T_2 - \text{ постоянные време-}$$

ни КЗ 5.

Сигнал КЗ 5 через усилитель 4 с коэффициентом передачи K_{y1} поступает на двигатель стабилизации 3, формирующий момент разгрузки, стремящийся вернуть наружную рамку 1 в исходное положение. На рисунке 2 датчики момента ДНГ 10 обозначены как 18, 21, а усилители контуров управления – как 19, 22. Введение в усилительно-преобразующий тракт канала наружной рамки 1 КЗ 8 позволяет обеспечить астатизм первого порядка передаточной функции, являю-

щейся отношением погрешности стабилизации к возмущающему моменту, что приводит к увеличению точности стабилизации на низких частотах, отсутствию систематического дрейфа СС от действия постоянного момента по оси стабилизации для любого из рассмотренных выше случаев (4), (5), (6) описания динамических свойств ДНГ. Кроме того, КЗ 8 и КЗ 5 обеспечивают устойчивый режим работы системы. Структура построения канала стабилизации внутренней рамки аналогична структуре построения канала стабилизации наружной рамки. Датчик угла 17 ДНГ 10 формирует сигнал, пропорциональный отклонению платформы 2 по каналу внутренней рамки, который поступает на вход КЗ 16. Сигнал с выхода КЗ 16 поступает на вход КЗ 15 и далее на вход КЗ 14. Сигнал с выхода КЗ 14 поступает на вход КЗ 13 и далее через усилитель 12 поступает на двигатель стабилизации 11.

Результаты моделирования

На рисунке 3 приведены логарифмические амплитудно-частотные характеристики двухосной индикаторной СС на ДНГ с передаточной функцией УПТ:

$$W'_{kz1}(p) = k'_{y1} \frac{(1 + T'_1 p)}{(1 + T'_2 p)}, T'_1 > T'_2 \quad (7)$$

и с передаточной функцией УПТ [10]:

$$W_{kz1}(p) = \frac{k_{y1} (1 + T_3 p) (T_4 p^2 + a_1 p + 1) (T_6 p^2 + a_3 p + 1)}{T p (T_5 p^2 + a_2 p + 1) (T_7 p^2 + a_4 p + 1)} \times \frac{(T_8 p^2 + a_5 p + 1) (1 + T_1 p)}{(T_9 p^2 + a_6 p + 1) (1 + T_2 p)} \quad (8)$$

Из рисунка 3 следует, что, например, при частоте колебания основания 1,5 Гц угловая жесткость стабилизации платформы по возмущающему моменту, изменяющемуся по гармоническому закону, в установившемся режиме в 31 раз выше у двухосной индикаторной СС на ДНГ в случае (8) по сравнению с (7). Введение в УПТ канала наружной рамки 1 КЗ 6 и КЗ 7, настроенных на первую и вторую гармоники частоты вращения ротора ДНГ 10 и нутационную частоту колебаний ротора, обеспечивает увеличение помехозащищенности прибора. Логарифмическая амплитудно-фазочастотная характеристика передаточной функции последовательно соединенных КЗ 6 и КЗ 7, приведенная на рисунке 4, показывает, что введение КЗ 6 и КЗ 7 обеспечивает ослабление

помехи в выходном сигнале ДНГ 10 в 25 раз на частоте вращения ротора, на двойной частоте вращения ротора и нутационной частоте ДНГ 10. Структура усилительно преобразующего тракта СС по каналу внутренней рамки аналогична структуре канала наружной рамки.

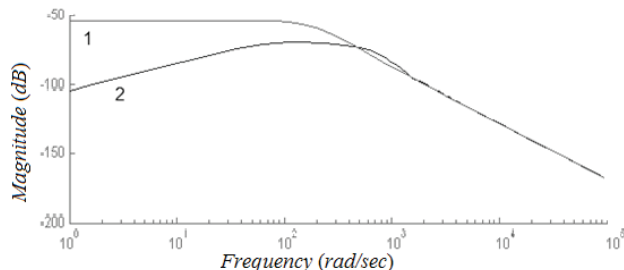


Рисунок 3 – Логарифмические амплитудно-частотные характеристики двухосной индикаторной системы стабилизации на динамически настраиваемом гироскопе: 1 – с передаточной функцией усилительно преобразующего тракта (7); 2 – с передаточной функцией усилительно преобразующего тракта (8)

Figure 3 – The Bode Diagram of biaxial indicative stabilization system on dynamically tuned gyroscope: 1 – with the transfer function (7); 2 – with the transfer function (8)

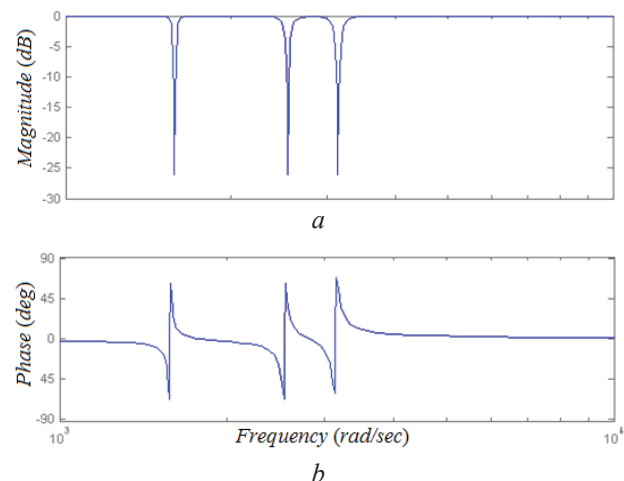


Рисунок 4 – Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика последовательно соединенных звеньев КЗ 6, КЗ 7 (a) и фазовая частотная характеристика последовательно соединенных звеньев КЗ 6, КЗ 7 (b)

Figure 4 – Logarithmic amplitude frequency response of series-connected corrective links 6 and 7 (a) and phase frequency characteristic of series-connected corrective links 6 and 7 (b)

График погрешности стабилизации при равночастотной трехкомпонентной качке основания с амплитудой 5° представлен на рисунке 5. Амплитуда погрешности не превышает $0,0042^\circ$.

Графики на рисунках 3, 4 и график погрешности стабилизации на рисунке 5 получены

при следующих параметрах индикаторной СС на ДНГ: $J_y \cos^2 \varphi_z + J_x \sin^2 \varphi_z + J_{y1} = 0,026 \text{ кгм}^2$; $b_1 = 0,0041 \text{ Нмс}$; $T = T_1 = T_3 = 0,01 \text{ с}$; $T_2 = 0,0012 \text{ с}$; $T_4 = T_5 = 4,057 \times 10^{-7} \text{ с}^2$; $a_1 = 5 \times 10^{-7}$; $a_2 = 1 \times 10^{-5}$; $T_6 = T_7 = 1,014 \times 10^{-7} \text{ с}^2$; $a_3 = 5 \times 10^{-7}$; $a_4 = 1 \times 10^{-5}$; $T_8 = T_9 = 1,54 \times 10^{-7} \text{ с}^2$; $a_5 = 5 \times 10^{-7}$; $a_6 = 1 \times 10^{-5}$, которые соответствуют реализованной двухосной СС весом 6 кг, предназначенной для стабилизации нагрузки весом 3,5 кг. СС имеет углы прокачки $\pm 30^\circ$ и габаритные размеры: диаметр 200 мм, длина 210 мм.

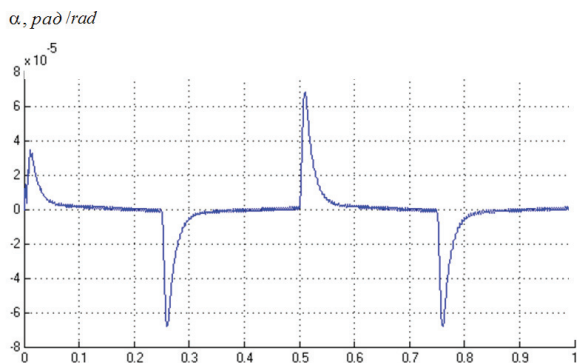


Рисунок 5 – Погрешность стабилизации

Figure 5 – Error of stabilization

Заключение

С использованием уравнений Эйлера разработана математическая модель системы стабилизации полезной нагрузки на динамически настраиваемом гироскопе, отличающаяся от имеющихся описанием возмущающих моментов не в обобщенном виде, а подробным представлением возмущений в виде функций кинематических параметров качки основания и движения элементов карданова подвеса. Исследования выходного сигнала гироскопа позволили выявить частоты преобладающих составляющих шума, которые соответствуют частоте вращения ротора гироскопа, двойной частоте вращения ротора гироскопа и нутационной частоте колебаний ротора.

Предложена структурная схема построения усилительно-преобразующих трактов каналов стабилизации, учитывающая особенности функционирования динамически настраиваемого гироскопа и обеспечивающая увеличение точности стабилизации на низких частотах (например, в установившемся режиме при частоте колебания основания 1,5 Гц угловая жесткость стабилиза-

ции платформы по отношению к моменту, изменяющемуся по гармоническому закону, в 31 раз выше у двухосной индикаторной системы стабилизации на динамически настраиваемом гироскопе с предложенной схемой УПТ по сравнению с исходной), а также обеспечивающая отсутствие систематического дрейфа системы стабилизации от действия постоянных моментов по оси стабилизации. Кроме того, предложенная схема позволяет в 25 раз уменьшить амплитуду преобладающих составляющих шума в выходном сигнале гироскопа. Результаты моделирования показывают возможность обеспечения амплитуды погрешности стабилизации не более $0,0042^\circ$ при трехкомпонентной качке основания.

Список использованных источников

1. Малютин, Д.М. Комбинированная двухосная гировертикаль / Д.М. Малютин // Авиакосмическое приборостроение. – 2005. – № 3. – С. 6–10.
2. Распопов, В.Я. Гироскопы в системах гироскопической стабилизации / В.Я. Распопов, Д.М. Малютин, Ю.В. Иванов // Инженерный журнал с приложением. – 2009. – № 7. – С. 52–58.
3. Распопов, В.Я. Силовые гиросtabilизаторы. Основы теории, конструкция и применение / В.Я. Распопов // Инженерный журнал с приложением. – 2015. – № 53. – С. 1–28.
4. Распопов, В.Я. Непосредственные гиросtabilизаторы. Развитие идей и применений / В.Я. Распопов // Инженерный журнал с приложением. – 2015. – № 51 (214). – С. 1–32.
5. Заимко, А.В. Двухканальная схема динамически настраиваемого гироскопа / А.В. Заимко, В.В. Мелешко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Сер.: Приладобудування. – 2013. – Вип. 45. – С. 17–23.
6. Cruber Josef P. Dynamically turned gyro. Patent US 5105669, 1992.
7. Матвеев, В.А. Гироскопические стабилизаторы на динамически настраиваемых гироскопах / В.А. Матвеев, В.П. Подчерзцев, В.В. Фатеев. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 103 с.
8. Пельпор, Д.С. Гироскопические системы. Теория гироскопов и гиросtabilизаторов / Д.С. Пельпор. – М.: Высшая школа, 1986. – 423 с.
9. Пельпор, Д.С. Динамические настраиваемые гироскопы / Д.С. Пельпор, В.А. Матвеев. – М.: Машиностроение, 1988. – 264 с.
10. Двухосный индикаторный гиросtabilизатор на динамически настраиваемом гироскопе / Д.М. Малютин, М.И. Дегтярев. Патент РФ на полезную модель №1 22477, 2012.

The stabilization system on payload built on a dynamically tuned gyroscope

Malyutin D.M.

Tula state University,
Lenin Ave., 92, 300000, Tula, Russia

Received 08.02.2016

Accepted for publication 25.04.2016

Abstract. It is now widely distributed systems stabilization based on gyroscopes with three-degree-freedom and based on gyroscopes with ball suspension. The accuracy and resource of operation of such systems requires an increase. The problem of improving the accuracy and increasing the service life of information – measuring systems of stabilization can be solved by using as a sensitive element of a dynamically tuned gyroscope. Today the issue of achieving the potential of the metrological characteristics of information-measuring systems stabilization on dynamically tuned gyroscope is not fully resolved. It requires the development of mathematical models, different from the known, detailed description of the perturbations acting on a device. In addition, it is necessary to develop structures amplifying-transforming paths of the contours stabilization of information-measuring systems of stabilization on dynamically tuned gyroscopes, assuring higher accuracy and noise immunity of the system, what is the purpose of the work. In using the Euler equations obtained a complete mathematical model of functioning system with three motion bases, in detail taking into account the disturbances acting on the device. Considered are the peculiarities of mathematical description of dynamically tuned gyroscope. Dominant frequencies of components noise is identified in the output signal of the gyroscope. The original scheme of the contours stabilization is presented, that help increase the accuracy of stabilization at low frequencies and of providing the absence of systematic drift of the gyrostabilizer from the action of the permanent disturbing moment along the axis of stabilization. The dynamic calculations show the possibility of providing error of stabilization on payload not more than 0,0042 degree.

Keywords: systems stabilization, gyroscope, error of stabilization.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-32-40

Адрес для переписки:

Малютин Д.М.
пр. Ленина, 92, 300000, г. Тула, Россия
ул. Ленинградская, 14, 220008, г. Минск, Беларусь
e-mail: MalyutinDM@yandex.ru

Address for correspondence:

Malyutin D.M.
Tula state University,
Lenin Ave., 92, 300000, Tula, Russia
e-mail: MalyutinDM@yandex.ru

Для цитирования:

Малютин Д.М.
Система стабилизации полезной нагрузки
на динамически настраиваемом гироскопе.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 1. – С. 32–40.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-32-40

For citation:

Malyutin D.M.
[The stabilization system on payload built on a dynamically tuned
gyroscope].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 1, pp. 32–40 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-32-40

References

1. Malyutin D.M. [Combined biaxial gyrovertical]. *Aviakosmicheskoye priborostroyeniye*, 2005, no. 3, pp. 6–10 (in Russian).
2. Raspopov V.Ja., Malyutin D.M., Ivanov U.V. [The gyros in the gyroscopic stabilization systems]. *Inzhenernyj zhurnal s prilozheniyem*, 2009, no. 7, pp. 52–58 (in Russian).
3. Raspopov V.Ja. [Force gyrostabilizer. Fundamentals of theory, design and application]. *Inzhenernyj zhurnal s prilozheniyem*, 2015, no. 53, pp. 1–28 (in Russian).
4. Raspopov V.Ja. [Direct gyrostabilization. The development of ideas and applications]. *Inzhenernyj zhurnal s prilozheniyem*, 2015, no. 51(214), pp. 1–32 (in Russian).
5. Zaimko A.V., Meleshko V.V. [Two-channel scheme of dynamically tuned gyroscope]. *Vestnik Nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy «Kiyevski politekhnicheskii universitet», Ser. Priladobuduvaniya*, 2013, no. 45, pp. 17–23 (in Ukraine).
6. Cruber Josef P. Dynamically turned gyro. Patent US 5105669, 1992.
7. Matveev V.A., Podcetrtev V.P., Fateev V.V. *Girokopieskiye stabilizatory na dinamicheski nastrayemykh giroskopakh* [Gyroscopic stabilizers on dynamically tuned gyroscopes], Moscow, MGTU Publ., 2005, 103 p. (in Russian).
8. Pelpor D.S. *Girokopieskiye sistemy. Teoriya giroskopov i girostabilizatorov* [Gyroscopic system. Theory of gyroscopes and gyrostabilizers], Moscow, Higher school Publ., 1986, 423 p. (in Russian).
9. Pelpor D.S., Matveev V.A. *Dinamicheski nastrayemye giroskopy* [Dynamically tuned gyroscopes], Moscow, Machinebuilding Publ., 1988, 264 p. (in Russian).
10. Malyutin D.M., Degtarev M.I. *Dvukhstnyj indikatornyj stabilizator na dinamicheski nastrayemom gyroskope* [Biaxial indicator gyrostabilizer on dynamically tuned gyroscopes]. Patent RF, no. 122477, 2012 (in Russian).