УДК 531.383 DOI: 10.17587/mau.24.440-447

Д. М. Малютин, канд. техн. наук, проф., Malyutindm@yandex.ru,
В. Я. Распопов, д-р техн. наук, проф., tgupu@ yandex.ru,
Ю. В. Иванов, д-р техн. наук, проф., tgupu@ yandex.ru,
ФГБОУ ВО Тульский государственный университет

Способ увеличения точности гироскопа со сферическим шарикоподшипниковым подвесом

Обсуждается способ повышения точности гироскопа со сферическим шарикоподшипниковым подвесом, работающим в режиме измерителя угла отклонения основания, на котором он установлен. При работе гироскопа в составе информационно-измерительной и управляющей системы определяющее значение имеет такая эксплуатационная характеристика, как точность показаний, зависящая от шумовой составляющей выходного сигнала гироскопа. Решение вопроса уменьшения шумовой составляющей выходного сигнала при сохранении широкой полосы пропускания прибора и минимального фазового отставания выходного сигнала по отношению к измеряемой величине является целью данного исследования. Приведен обзор существующих схем построения прибора. Представлено математическое описание функционирования гироскопа, на основании которого получены передаточные функции по моменту (возмущающему, управляющему или суммарному) по прямому и перекрестному каналам. Получены также передаточные функции, являющиеся отношением выходного сигнала к измеряемой величине по прямому и перекрестному каналам. Построены частотные и переходные характеристики прибора. Отмечено, что частоты преобладающих составляющих шума выходного сигнала соответствуют нутационной частоте колебаний ротора гироскопа, частоте вращения ротора гироскопа и кратным частотам вращения ротора гироскопа. Предложена структура измерительной системы, в которой сигнал с датчика угла гироскопа со сферическим шарикоподшипниковым подвесом по соответствующей координате суммируется с выходным сигналом дополнительного датчика угловой скорости, и далее суммарный сигнал сглаживается с помощью апериодического звена первого порядка. Получены выражения для определения параметров канала измерителя угловой скорости, при которых удается компенсировать в канале измерения угла ограничения полосы пропускания, обусловленные постоянной времени сглаживающего фильтра, и обеспечить в то же время эффективное подавление шумовой составляющей выходного сигнала. Исследования проведены с использованием методов теории автоматического управления. Предложенная схема построения измерителя обеспечивает уменьшение составляющих шума в выходном сигнале гироскопа со сферическим шарикоподшипниковым подвесом на частоте вращения ротора гироскопа 250 Гц в 156 раз, на частоте нутационных колебаний ротора гироскопа 404 Гц — в 256 раз, на частоте 500 Гц — в 316 раз, на частоте 750 Гц — в 474 раза, на частоте 1000 Гц — в 630 раз, на частоте 1250 Гц — в 785 раз при сохранении широкой полосы пропускания 285 Гц при измерении угла с фазовым отставанием выходного сигнала от измеряемого, близким к нулю градусов в полосе пропускания.

Ключевые слова: *гироскоп, сферический шарикоподшипниковый подвес, информационно-измерительная система*

Введение

Электромеханические гироприборы с кардановым подвесом имеют самую продолжительную историю развития по сравнению с другими классами гироприборов [1, 2]. Теория гироприборов этого класса изложена в многочисленных статьях, монографиях, например [3—5], учебниках и учебных пособиях, например [6—8]. Работы по исследованию и совершенствованию гироприборов этого класса продолжаются [9—11, 27, 28].

В 60-х годах прошлого века за рубежом, особенно в США, началась активная работа по созданию гироприборов на базе трехстепенного гироскопа со сферическим шарикоподшипниковым подвесом (СШПП) как альтернативы гироприборам с кардановым подвесом. Были предложены многочисленные варианты конструктивных решений корректируемых и некорректируемых гироскопов с СШПП [12—19, 32]. Гироприборы с СШПП имеют разнообразные двигатели вращения ротора (электрические, пружинные, газовые), устройства коррекции и другие конструктивные особенности, но схема гироскопа с СШПП принципиально однотипна (рис. 1) [8].

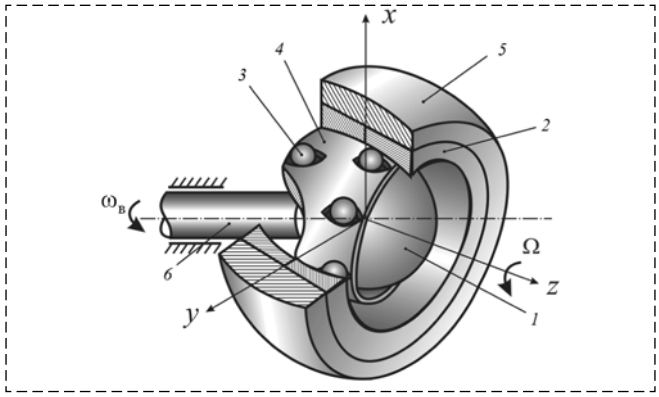

Рис. 1. Принципиальная схема трехстепенного гироскопа с СШПП:

1 — внутреннее кольцо; *2* — наружное кольцо; *3* — шарики; 4 — сепаратор; *5* — ротор; *6* — ось

Fig. 1. Schematic diagram of a three—stage gyroscope with SSHPP:

1 — inner ring; *2* — outer ring; *3* — balls; *4* — separator; *5* — rotor; *6* — axis

В общем случае кольцо *1* имеет угловую скорость вращения основания $\omega_в$, а кольцо *2* вместе с ротором *5* — угловую скорость собственного вращения Ω в системе координат *xyz*, связанной с главной осью гироскопа *z*.

С конца 1970-х годов и у отечественных разработчиков появился интерес к гироскопам с СШПП, который имел под собой вполне материальную основу в виде серии специальных двухрядных сферических шарикоподшипников, разработанных в НПО "ВНИИПП" (г. Москва). Типовая конструктивная схема СШПП [20] приведена на рис. 2.

Выпускаемые в настоящее время сферические шарикоподшипники имеют следующие основные характеристики: частота вращения — до 1000 $с^{-1}$; амплитуда колебаний, определяющая допускаемые углы прокачки ротора, зависит от размеров *H*, *D*, *d* и лежит в пределах от ±1...±25°; рабочая температура — до 150 °С; допустимое напряжение в зонах контакта шариков с опорными поверхностями — 210 МПа. Значения углов прокачки достаточны для использования этих подшипников в качестве СШПП корректируемых и некорректируемых гироскопических датчиков углов.

В работе [21] показано, что возможно построение измерителей угловых перемещений продольной оси летательных аппаратов (ЛА), в том числе, вращающихся по крену, на базе трехстепенных некорректируемых гироскопов с СШПП. В этих конструкциях СШПП обеспечивают необходимые углы прокачки, а ротор после разгона вращается по инерции (на выбеге). Корректируемые гироскопы с СШПП работают в контуре стабилизации и управления гироплатформ с установленной на них полезной нагрузкой. В этом случае не требуется больших углов прокачки СШПП, при этом в режиме управления ротор должен иметь постоянную скорость вращения, и должны быть обеспечены необходимые скорости прецессии гироскопа.

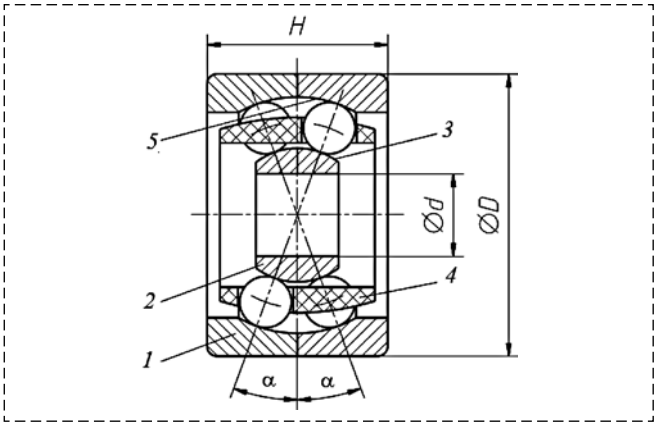

Рис. 2. Конструктивная схема специального шарикоподшипника, используемого в качестве СШПП:

1 — наружное кольцо (наружный опорный элемент); *2* — внутреннее кольцо (внутренний опорный элемент); *3, 5* — сферические поверхности колец; *4* — сепаратор

Fig. 2. Design diagram of a special ball bearing used in the quality of the SSHPP:

1 — outer ring (outer support element); *2* — inner ring (inner support element); *3, 5* — spherical ring surfaces; *4* — separator

С конца 1970-х — начала 1980-х годов начались отечественные разработки гироприборов с СШПП, которые продолжаются до настоящего времени [22—28]. Эксплуатационные характеристики СШПП обеспечивают широкое применение гироскопов с этим типом подвеса: в инклинометрах, например ИГН 73-100/80 разработки ПАО "Темп-Авиа"; в гиростабилизаторах оптической аппаратуры серий "С" и "ГС" [29, 32]. В зарубежных системах стабилизации полезной нагрузки используются такие приборы, как например, твердотельные вибрационные гироскопы 10MS0056, 10MS58, 20MS56 фирмы Sagem (Франция) [30], но отечественные реалии таковы, что приходится модернизировать гироприборы с СШПП.

При работе гироскопа в контуре управляемого гиростабилизатора оптико-электронной аппаратуры определяющее значение имеют такие эксплуатационные характеристики, как скорость управляемого движения (скорость прецессии) и точность показаний, зависящая от шумовой составляющей выходного сигнала гироскопа. Решение вопроса уменьшения шумовой составляющей выходного сигнала при сохранении широкой полосы пропускания прибора является целью данного исследования.

Математическая модель управляемого гироскопа со сферическим шарикоподшипниковым подвесом

Математическую модель управляемого гироскопа с СШПП можно представить в следующем виде [31]:

$$\begin{aligned}(J_э p^2 + \nu p + m_п)\psi(p) - Hp(\theta(p) + \\ + \alpha(p)) - m_{рв}\theta(p) = M_В^{\psi} + M_{упр}^{\psi}; \\ (J_э p^2 + \nu p + m_п)\theta(p) - Hp(\psi(p) + \\ + \beta(p)) - m_{рв}\psi(p) = M_В^{\theta} + M_{упр}^{\theta},\end{aligned} \quad (1)$$

где $J_э$ — экваториальный момент ротора; ν — коэффициент демпфирования; $m_п$ — удельный перекрестный момент; H — кинетический момент; $m_{рв}$ — удельный радиально-восстанавливающий момент; ψ, θ — углы поворота ротора относительно измерительных осей; α, β — углы поворота корпуса (измерительных осей) гироскопа в инерциальном пространстве; $M_В^ψ$, $M_В^θ$ — возмущающие моменты гироскопа; $M_{упр}^ψ$, $M_{упр}^θ$ — моменты управления; p — оператор дифференцирования.

В случае неподвижного корпуса гироскопа углы α, β равны нулю и уравнения движения гироскопа принимают следующий вид:

$$(J_э p^2 + \nu p + m_п)\psi(p) - \theta(p)(Hp + m_{рв}) = M_В^ψ + M_{упр}^ψ;$$

$$(J_э p^2 + \nu p + m_п)\theta(p) + \psi(p)(Hp + m_{рв}) = M_В^θ + M_{упр}^θ.$$

Структурная схема гироскопа с СШПП, соответствующая уравнениям (1), приведена на рис. 3.

Передаточная функция по моменту (возмущающему, управляющему или суммарному) имеет вид

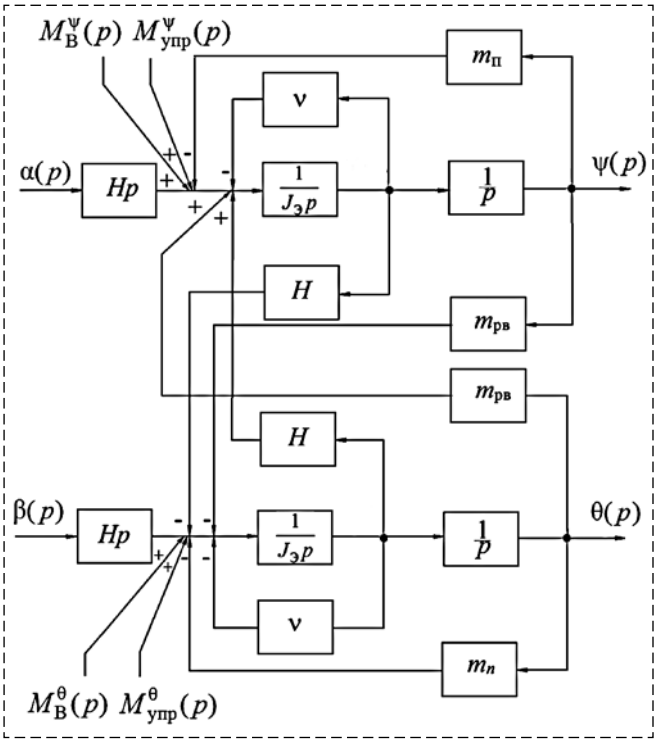

Рис. 3. Структурная схема гироскопа с СШПП
Fig. 3. Block diagram of a gyroscope with SSHPP

$$W_м(p) = \frac{\theta(p)}{M_{упр}^ψ(p)} = \frac{m_{рв}(T_г p + 1)}{(m_{рв}^2 + m_п^2)(T_р^2 p^2 + 2\xi_р T_р p + 1)(T_н^2 p^2 + 2\xi_н T_н p + 1)}, \quad (2)$$

где $T_г = H/m_{рв}$ — постоянная времени гироскопа, прецессирующего под действием момента $m_{рв}$; $T_р = H/m_п$ — постоянная времени гироскопа, прецессирующего под действием момента $m_п$; $T_н = J_э/H$ — постоянная времени гироскопа, соответствующая нутационным колебаниям; $\xi_р$, $\xi_н$ — относительные коэффициенты демпфирования.

Передаточная функция по моменту (возмущающему, управляющему или суммарному) по перекрестному каналу описывается формулой

$$W_{м1}(p) = \frac{\psi(p)}{M_{упр}^ψ(p)} = \frac{J_э p^2 + \nu p + m_п}{(m_{рв}^2 + m_п^2)(T_р^2 p^2 + 2\xi_р T_р p + 1)(T_н^2 p^2 + 2\xi_н T_н p + 1)}. \quad (3)$$

Измерительная передаточная функция гироскопа имеет вид

$$W_{и1}(p) = \frac{\theta(p)}{\alpha(p)} = \frac{Hp(Hp + m_{рв})}{(m_{рв}^2 + m_п^2)(T_р^2 p^2 + 2\xi_р T_р p + 1)(T_н^2 p^2 + 2\xi_н T_н p + 1)}. \quad (4)$$

Измерительная передаточная функция гироскопа по перекрестному каналу представляется в виде

$$W_и(p) = \frac{\psi(p)}{\alpha(p)} = \frac{Hp(J_э p^2 + \nu p + m_п)}{(m_{рв}^2 + m_п^2)(T_р^2 p^2 + 2\xi_р T_р p + 1)(T_н^2 p^2 + 2\xi_н T_н p + 1)}. \quad (5)$$

Приведем логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАФЧХ) гироскопа с СШПП при следующих параметрах: $J_э$ = 0,000013 кг·м^2; $m_{рв}$ = 0,00000035 Н·м/рад; ν = 0,0001 Н·м·с; H = 0,04 Н·м·с; $m_п$ = = 0,0000008 Н·м/рад.

На рис. 4 представлена ЛАФЧХ по управляющему (возмущающему) воздействию в соответствии с передаточной функцией (2). На рис. 5 представлена ЛАФЧХ по управляющему (возмущающему) воздействию по перекрестному каналу в соответствии с передаточной функцией (3). На рис. 6 представлен график

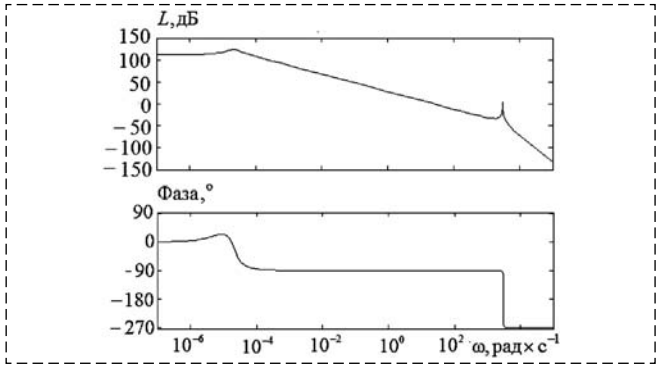

Рис. 4. ЛАФЧХ в соответствии с передаточной функцией (2)
Fig. 4. LFCH according to with transfer function (2)

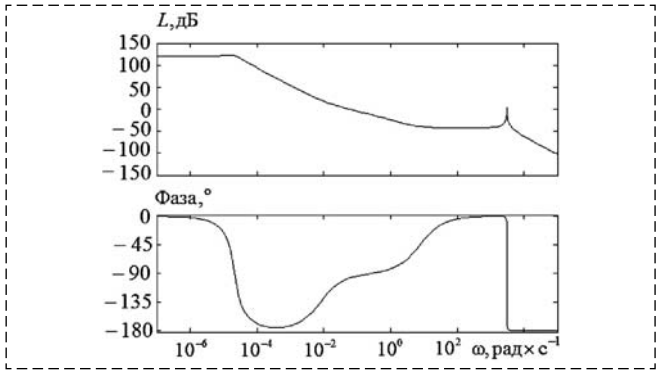

Рис. 5. ЛАФЧХ в соответствии с передаточной функцией (3)
Fig. 5. LFCH according to with transfer function (3)

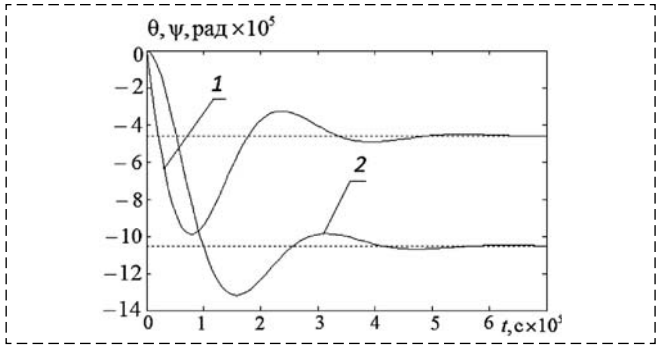

Рис. 6. Реакция на единичное управляющее воздействие:
1 — в прямом канале (θ); *2* — в перекрестном канале (ψ)
Fig. 6. Reaction to a single control impact:
1 — in a direct channel (θ); *2* — in the cross channel (ψ)

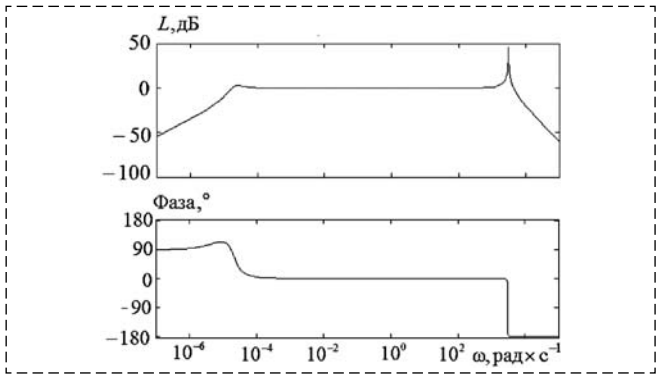

Рис. 7. ЛАФЧХ в соответствии с передаточной функцией (4)
Fig. 7. LFCF in accordance with a transfer function (4)

переходного процесса как реакция на единичное управляющее (возмущающее) воздействие по передаточной функции (2) и перекрестному каналу (по передаточной функции (3)). На рис. 7 представлена ЛАФЧХ, характеризующая измерительные свойства гироскопа по передаточной функции (4).

На рис. 8 представлен график переходного процесса как реакция на единичное ступенчатое отклонение основания по координате α. На рис. 9 представлена ЛАФЧХ, характеризующая измерительные свойства гироскопа по передаточной функции (5) по перекрестному каналу. На рис. 10 представлен график переходного процесса как реакция на единичное ступенчатое отклонение основания по координате α по перекрестному каналу. Логарифмическая амплитудно частотная характеристика (ЛАЧХ) гироскопа имеет два резонансных всплеска — низкочастотный, который характеризуется частотой $\omega_р = m_п/H$, и высокочастотный на частоте нутации $\omega_н = m_п/J_э$. Кроме того, динамику гироскопа определяет сопряженная частота $\omega_г = m_{рв}/H$. Испытания гироскопа с СШПП по-

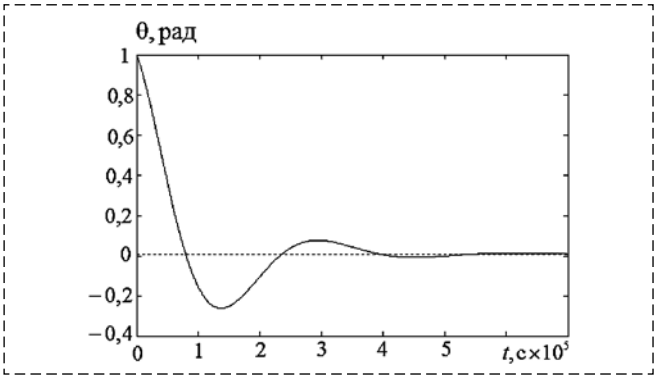

Рис. 8. Реакция на единичное ступенчатое отклонение основания в прямом канале (θ)
Fig. 8. Reaction to a single stepwise deviation of the base by in the live channel (θ)

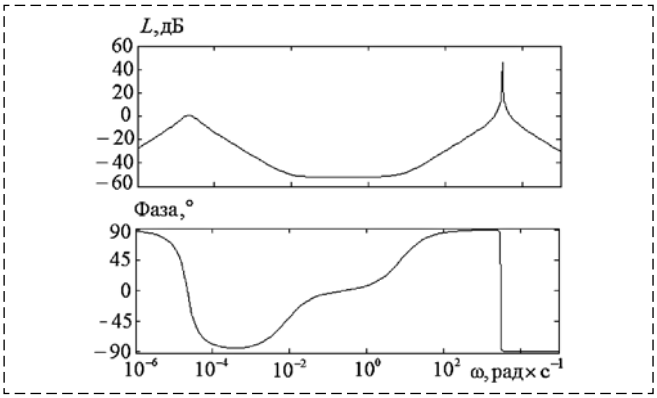

Рис. 9. ЛАФЧХ в соответствии с передаточной функцией (5)
Fig. 9. LFCF in accordance with the transfer function (5)

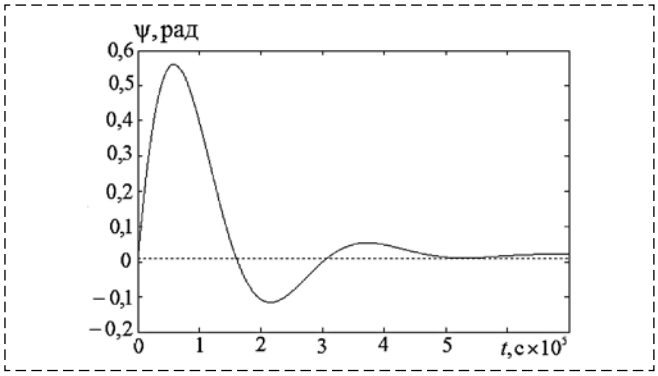

Рис. 10. Реакция на единичное ступенчатое отклонение основания в перекрестном канале (ψ)

Fig. 10. Reaction to a single step deviation of the base in the cross channel (ψ)

казали, что частоты преобладающих составляющих шума выходного сигнала соответствуют нутационной частоте колебаний ротора гироскопа, частоте вращения ротора гироскопа и частотам, кратным частоте вращения ротора гироскопа.

Структура построения измерительной системы, обеспечивающая эффективное уменьшение шумовой составляющей выходного сигнала гироскопа с СШПП

Структурная схема, обеспечивающая эффективное уменьшение шумовой составляющей в выходном сигнале гироскопа с СШПП, представлена на рис. 11.

Сигнал с датчика угла гироскопа по соответствующей координате суммируется с выходным сигналом дополнительного датчика угловой скорости, и далее суммарный сигнал сглаживается с помощью апериодического звена первого порядка. На структурной схеме (рис. 11) дополнительно обозначены: $K_{\text{ду}\theta}$ — коэффициент передачи датчика угла гироскопа с СШПП; K_1 — коэффициент передачи канала измерения угловой скорости; $U_{\text{ш}1}$ — шумовая составляющая выходного сигнала гироскопа с СШПП; $U_{\text{ш}2}$ — шумовая составляющая выходного сигнала дополнительного датчика угловой скорости; $K_{\text{дус}}$ — коэффициент передачи датчика угловой скорости; $\xi_{\text{дус}}$ — коэффициент демпфирования собственных колебаний датчика угловой скорости; $T_{\text{дус}}$ — постоянная времени датчика угловой скорости; $T_{\text{с}}$ — постоянная времени сглаживающего фильтра; U_θ — напряжение на выходе системы.

Искомая передаточная функция имеет вид

$$W_{\text{и}1}(p)=\frac{U_\theta(p)}{\alpha(p)}=\left(K_{\text{ду}\theta}\frac{Hp(Hp+m_{\text{рв}})}{(m_{\text{рв}}^2+m_{\text{п}}^2)(T_{\text{р}}^2p^2+2\xi_{\text{р}}T_{\text{р}}p+1)(T_{\text{н}}^2p^2+2\xi_{\text{н}}T_{\text{н}}p+1)}+\frac{pK_{\text{дус}}K_1}{T_{\text{дус}}^2p^2+2\xi_{\text{дус}}T_{\text{дус}}p+1}\right)\frac{1}{T_{\text{с}}p+1}. \quad (6)$$

Найдем выражение для коэффициента передачи канала датчика угловой скорости. Как видно из результатов, приведенных выше, в полосе частот от $\omega_{\text{р}}$ до $\omega_{\text{н}}$ гироскоп с СШПП работает по прямому каналу в режиме датчика угла, поэтому передаточная функция (6) может быть записана в виде

$$W_{\text{и}1}(p)=\frac{U_\theta(p)}{\alpha(p)}=\left(K_{\text{ду}\theta}+\frac{pK_{\text{дус}}K_1}{T_{\text{дус}}^2p^2+2\xi_{\text{дус}}T_{\text{дус}}p+1}\right)\frac{1}{T_{\text{с}}p+1}=$$

$$=K_{\text{ду}\theta}\left(\frac{T_{\text{дус}}^2p^2+p(2\xi_{\text{дус}}T_{\text{дус}}+K_{\text{дус}}K_1/K_{\text{ду}\theta})+1}{T_{\text{дус}}^2p^2+2\xi_{\text{дус}}T_{\text{дус}}p+1}\right)\frac{1}{T_{\text{с}}p+1}=$$

$$=K_{\text{ду}\theta}\left(\frac{(T_1p+1)(T_2p+1)}{T_{\text{дус}}^2p^2+2\xi_{\text{дус}}T_{\text{дус}}p+1}\right)\frac{1}{T_{\text{с}}p+1}. \quad (7)$$

При равенстве постоянных времени T_1 и $T_{\text{с}}$ передаточная функция (7) преобразуется к виду

$$W_{\text{и}1}(p)=\frac{U_\theta(p)}{\alpha(p)}=$$

$$=K_{\text{ду}\theta}\left(\frac{T_2p+1}{T_{\text{дус}}^2p^2+2\xi_{\text{дус}}T_{\text{дус}}p+1}\right)\frac{1}{T_{\text{с}}p+1}. \quad (8)$$

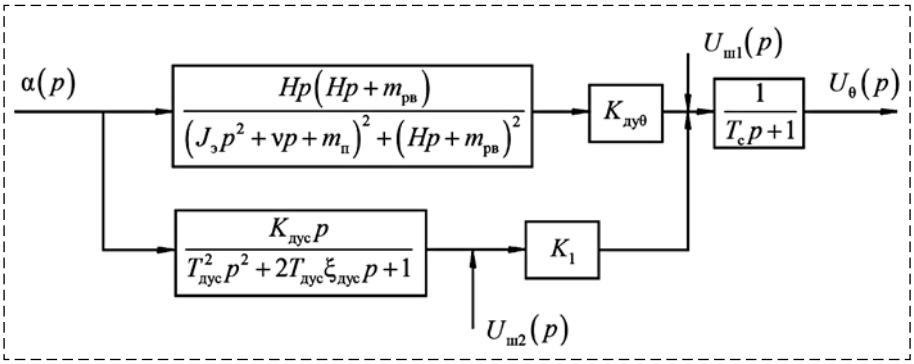

Рис. 11. Структурная схема измерительной системы

Fig. 11. Block diagram of the measuring system

Постоянные времени T_1, T_2 легко определить из системы уравнений

$$\begin{aligned}T_1T_2&=T_{\text{дус}}^2;\\ T_1+T_2&=2\xi_{\text{дус}}T_{\text{дус}}+\\ &+K_{\text{дус}}K_1/K_{\text{ду}\theta}.\end{aligned} \quad (9)$$

Положим постоянную времени $T_1=T_{\text{с}}=0{,}1$ с. При $K_{\text{ду}\theta}=0{,}4$ В/рад, $K_{\text{дус}}=1$ В·с/рад, $\xi_{\text{дус}}=0{,}7$, $T_{\text{дус}}=0{,}00053$ с получим

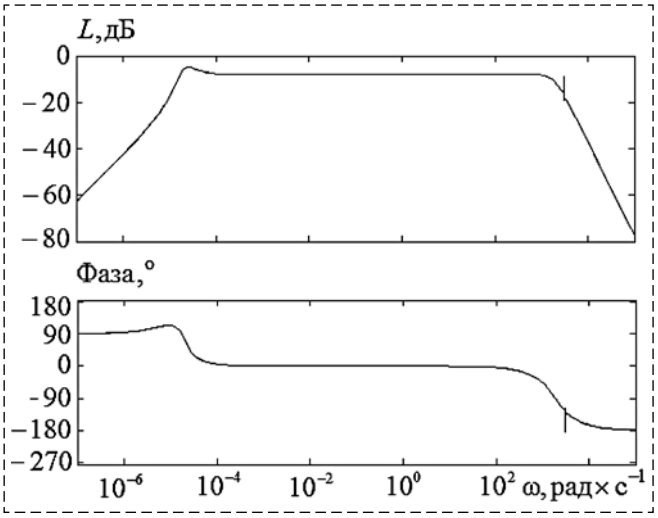

Рис. 12. ЛАФЧХ измерительной системы
Fig. 12. LFCH of the measuring system

$$K_1 = \frac{(T_1 + T_2 - 2\xi_{\text{дус}} T_{\text{дус}}) K_{\text{дуθ}}}{K_{\text{дус}}} = \\ = 0,0397032 + 0,4T_2. \qquad (10)$$

Так как $T_2 = T_{\text{дус}}^2 / T_1 = 0,0000028$ с, то $K_1 = 0,039706$.

Графики ЛАФЧХ по передаточной функции (6) с учетом (10) представлены на рис. 12. Полоса пропускания гироскопа составляет 1790 рад/с. В то же время удается обеспечить эффективное уменьшение шумовой составляющей в выходном сигнале как гироскопа с СШПП, так и дополнительного датчика угловой скорости. Действительно, передаточная функция, связывающая величины U_θ и $U_{\text{ш1}}$, имеет вид

$$W_{\text{и2}}(p) = \frac{U_\theta(p)}{U_{\text{ш1}}(p)} = \frac{1}{T_{\text{с}} p + 1}.$$

Передаточная функция, связывающая выходной сигнал и шум на выходе датчика угловой скорости, имеет вид

$$W_{\text{и3}}(p) = \frac{U_\theta(p)}{U_{\text{ш2}}(p)} = \frac{K_1}{T_{\text{с}} p + 1}.$$

Заключение

Рассмотренная в работе структурная схема измерительной системы обеспечивает уменьшение составляющих шума в выходном сигнале гироскопа с СШПП на частоте 250 Гц в 156 раз, на частоте 404 Гц — в 256 раз, на частоте 500 Гц — в 316 раз, на частоте 750 Гц — в 474 раза, на частоте 1000 Гц — в 630 раз, на частоте 1250 Гц — в 785 раз при сохранении широкой полосы пропускания от 0,00000426 Гц до 285 Гц при измерении угла с фазовым отставанием выходного сигнала от измеряемого, близким к нулю градусов. В отличие от схемы построения измерительного канала гироскопа с СШПП с режекторными фильтрами для уменьшения составляющих шума, настроенными на нутационную частоту колебаний ротора гироскопа, частоту вращения ротора гироскопа и частоты, кратные частоте вращения ротора гироскопа, в предложенной схеме осуществляется уменьшение составляющих шума не только на указанных выше фиксированных частотах, но и во всей полосе частот, начиная от частоты 1,6 Гц и выше. Обеспечено уменьшение составляющих шума в выходном сигнале дополнительного датчика угловой скорости, который также может быть реализован на основе гироскопа с СШПП, функционирующего в режиме датчика угловой скорости (путем введения обратной связи с датчика угла на датчик момента этого гироскопа), на частоте 250 Гц в 3935 раз, на частоте 404 Гц — в 6383 раза, на частоте 500 Гц — в 7852 раза, на частоте 750 Гц — в 11748 раза, на частоте 1000 Гц — в 14125 раз, на частоте 1250 Гц — в 19952 раз. Практическая реализация предлагаемой измерительной схемы позволит повысить точность гироскопа с СШПП при его использовании в составе информационно-измерительных и управляющих систем в режиме измерения угла отклонения основания.

Список литературы

1. **Пешехонов В. Г.** Гироскопы начала XXI века // Гироскопия и навигация. 2003. № 4 (43). С. 5—18.
2. **Харламов С. А.** Гироскоп с внешним кинетическим моментом — история первых исследований модели собственной вибрации // Сб. матер. III конф. молодых ученых "Навигация и управление движением". Под общ. ред. В. Г. Пешехонова. СПб.: Изд-во ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор",2001. С. 8—12.
3. **Николаи Е. Л.** Гироскоп в кардановом подвесе. М.: Наука, 1964. 52 с.
4. **Магнус К.** Гироскоп. Теория и применение / Под ред. Д. Блюмина. М.: Мир, 1974. 526 с.
5. **Ишлинский А. Ю.** Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. М.: Наука, 1976. 470 с.
6. **Пельпор Д. С.** и др. Гироскопические системы / Под ред. Д. С. Пельпора. М.: Высшая школа, 1988. 423 с.
7. **Матвеев В. А.** Гироскоп это просто: Учеб. пособ. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 209 с.
8. **Лукьянов Д. П., Распопов В. Я., Филатов Ю. В.** Прикладная теория гироскопов. СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2015. 315 с.

9. **Мелешко В. В.** Гироскоп направления с интегрально-позиционной горизонтальной коррекцией на качке // Вісник національного технічного університету України "Київски політехнічний інститут". Сер. Приладо будування. 2010. № 39. С. 14—20.

10. **Карасун В. В**., **Мельник В. Н.** Гироскоп направления со структурной избыточностью // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2011. Т. 2. С. 51—55.

11. **Останин С. Ю**. Состояние теории и практических реализаций систем электропитания и электроприводов гироскопов с механическим носителем кинетического момента // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского. 2017. № 5. С. 534—543.

12. **Патент** 3225609 США, МКИ G01C, НКИ 74-5.7. Two-axis Gyroscope. Приоритет 1962.

13. **Патент** 3408874 США, МКИ G01C, НКИ 74-5. Two-axis, nonfloated ball bearing Gyroscope. Приоритет 1965.

14. **Патент** 3417627 США, МКИ G01C, НКИ 74-5.6. Free-rotor gyro. Приоритет 1966.

15. **Патент** 3517562 США, МКИ G01C, НКИ 74-5.6. Inertial Gyroscope. Приоритет 1967.

16. **Патент**. 1473893 ФРГ, МКИ G01C, НКИ 42c, 25/51. Federgetriebener Kreisel. Приоритет 1970.

17. **Патент** 3019662 США, МКИ G01C, НКИ 74-5.7. Gyroscopic Control Mechanism. Приоритет 1975.

18. **Патент** 7707452 Франция, МКИ G05D 1/00//B 64G 1/100. La systeme gyroscopiques. Приоритет 1978.

19. **Патент**. 4309005 США, МКИ F423 13/30, F4 1G7/22, НКИ 244/3.16. Target seeking Gyro. Приоритет 1982.

20. **Подшипники** качения. Подшипники прогрессивных конструкций. Специальный двухрядный сферический шарикоподшипник: информационный листок. М.: ОАО "НПО "ВНИИП", 1986.

21. **Распопов В. Я.** Гироскопы с шарикоподшипниковым подвесом. Тула: Гриф и К, 2003. 175 с.

22. **Патент** 1345770 Российская Федерация, МПК G01C 25/00. Устройство для технологической приработки сферического шарикоподшипника гироскопа / Андреев А. А., Грязнов Е. А., Фрейман В. С. № 3978852/22; заявл. 15.11.85; опубл. 10.08.05, Бюл. № 22.

23. **А.с.** 282956 СССР. Гироскопический прибор / В. Я. Распопов, Ю. Н. Оськин (СССР). № 3177926; заявл. 31.07.87; опубл. 3.10.88.

24. **Патент** 2308680 Российская Федерация, МПК G01C 19/02, G01P 9/04. Гироскоп (варианты) / Гуськов А. А, Макаров А. М., Грязнов Е. А., Уракова Л. Е. № 2005137296/28; заявл. 30.11.05; опубл. 20.10.07, Бюл. № 29.

25. **Патент** 2460040 Российская Федерация, МПК G01C 19/02. Гироскоп (варианты) / Макаров А. М., Кожин В. В., Грязнов Е. А., Уракова Л. Е., Горбачев В. М. № 2011109981/28; заявл. 16.03.11; опубл. 27.08.12, Бюл. № 24.

26. **Патент** 2446382 Российская Федерация, МПК G01C 19/02. Гироскоп / Макаров АМ., Кожин ВВ., Грязнов ЕА., Уракова ЛЕ. № 2010133531/28; заявл. 10.08.10; опубл. 27.03.12, Бюл. № 9.

27. **Патент** 2572501 Российская Федерация, МПК G01C 25/00. Способ коррекции дрейфа гироскопа и устройство для его осуществления / Макаров АМ., Патрушев ИП. № 2014140387/28; заявл. 06.10.14; опубл. 10.01.16, Бюл. № 1.

28. **Мокров А. П., Макаров А. М.** Малогабаритный гироскоп со сферическим шарикоподшипниковым подвесом // Межвуз. сб. статей по материалам III всеросс. науч.-практ. конф. "Социально-экономические и технические проблемы оборонно-промышленного комплекса". 2016. С. 156—161.

29. "... **По имени** "Прогресс". ОАО "Мичуринский завод "Прогресс". Рязань: Изд-во "ИП Потапов В. С.", 2007. 216 с.

30. **URL:** www.sagem-ds.com.

31. **Распопов В. Я., Малютин Д. М., Алалуев Р. В., Телухин С. В., Шепилов С. И.** Гироскопический датчик углов со сферическим шарикоподшипниковым подвесом с улучшенными эксплуатационными характеристиками // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26, № 2 (101). С. 88—94.

32. **Распопов В. Я., Малютин Д. М., Иванов Ю. В.** Гироскопы в системах гироскопической стабилизации // Справочник. Инженерный журнал. 2009. № 7 (148). С. 52—58.

Method for Increasing the Accuracy of a Gyroscope with a Spherical Ball Bearing Suspension

D. M. Malyutin, malyutindm@yandex.ru, **V. Ya. Raspopov,** tgupu@yandex.ru, **Yu. V. Ivanov,** tgupu@yandex.ru,
Tula State University, Tula, 300000, Russian Federation

Corresponding author: **Malyutin Dmitry M.,** Cand. of Tech. Sc., Professor, Tula State University, Tula, 300000, Russian Federation, e-mail: Malyutindm@yandex.ru

Accepted on March 02,2023

Abstract

The article is devoted to the development of a method for improving the accuracy of a gyro with a spherical ball bearing suspension operating in the mode of a deflection angle meter of the base on which it is installed. When operating a gyroscope as part of an information-measuring and control system, such an operational characteristic as the accuracy of readings, depending on the noise component of the gyroscope output signal, is of decisive importance. The purpose of the article is to solve the problem of reducing the noise component of the output signal while maintaining a wide bandwidth of the device and a minimum phase delay of the output signal in relation to the measured value. The paper provides an overview of the existing device construction schemes. A mathematical description of the functioning of the gyroscope is presented, on the basis of which the transfer functions for the moment (disturbing, controlling or total) along the direct and cross channels are obtained. Transfer functions are also obtained, which are the ratio of the output signal to the measured value through direct and cross channels. It is noted that the predominant frequencies of the noise component of the output signal correspond to the rotational frequency of the gyroscope rotor, the rotation frequency of the gyroscope rotor and the multiple rotation frequencies of the gyroscope rotor. The structure of the system is proposed in which the signal from the gyroscope angle sensor with a spherical ball bearing suspension is summed up with the output signal of an additional angular velocity sensor according to the corresponding coordinate and then the total signal is smoothed using an aperiodic link of the first order. The results are obtained for determining the parameters of the channel of the angular velocity meter, at which it is possible to compensate for the bandwidth limitations in the channel of the angle measurement due to the time constant

of the smoothing filter and at the same time ensure effective suppression of the noise component of the output signal. The proposed construction scheme of the meter provides attenuation of noise components in the output signal of a gyroscope with a spherical ball bearing suspension at a rotation frequency of the gyroscope rotor 250 Hz by 156 times, at a frequency of nutation oscillations of the gyroscope rotor 404 Hz by 256 times, at a frequency of 500 Hz by 316 times, at a frequency of 750 Hz by 474 times, at a frequency of 1000 Hz by 630 times, at a frequency of 1250 Hz by 785 times while maintaining a wide bandwidth of 285 Hz when measuring an angle with a phase lag of the output signal from the measured one close to zero degrees in the bandwidth.

Keywords: *gyroscope, spherical ball bearing suspension, information and measurement system*

For citation:

Malyutin D. M., Raspopv V. Ya., Ivanov Yu. V. Method for Increasing the Accuracy of a Gyroscope with a Spherical Ball Bearing Suspension, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2023, vol. 24, no. 8, pp. 440—447.

DOI: 10.17587/mau.24.440-447

References

1. **Peshekhonov V. G.** Gyroscopes of the beginning of the XXI century, *Gyroscopy and navigation*, 2003, vol. 4, no. 43, pp. 5—18 (in Russian).

2. **Kharlamov S. A.** Gyroscope with an external kinetic moment — the history of the first studies of the self-vibration model, *Collection of materials of the III Conference of young scientists "Navigation and motion control*, St. Petersburg, Publishing House of the State Research Center of the Russian Federation JSC "Concern "Central Research Institute "Electropribor", 2001, pp. 8—12 (in Russian).

3. **Nicolai E. L.** Gyroscope in a gimbal, Moscow, Nauka, 1964, 52 p. (in Russian).

4. **Magnus K.** Gyroscope. Theory and application, Moscow, Mir, 1974, 526 p. (in Russian).

5. **Ishlinskiy A. Yu.** Orientation, gyroscopes and inertial navigation, Moscow, Nauka, 1976, 470 p. (in Russian).

6. **Pelpor D. S.** Gyroscopic systems, Moscow, Higher School, 1988, 423 p. (in Russian).

7. **Matveev V. A.** Gyroscope is simple, Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2012, 209 p. (in Russian).

8. **Lukyanov D. P., Raspopov V. Ya., Filatov Yu. V.** Applied theory of gyroscopes, St. Petersburg: SSC RF JSC "Concern "Central Research Institute "Electropribor", 2015, 315 p. (in Russian).

9. **Meleshko V. V.** Gyroscope of the direction with integral-positional horizontal correction on pitching // Visnik of the National Technical University of Ukraine "Kievsky politechnichny Institute". A series of Prilado buduvaniya, 2010, no. 39, pp. 14—20 (in Ukraine).

10. **Karasun V. V., Melnik V. N.** Gyroscope directions with structural redundancy, *Eastern European Journal of Advanced Technology,* 2011, vol. 2, pp. 51—55 (in Russian).

11. **Ostanin S. Yu.** The state of theory and practical implementations of power supply systems and electric drives of gyroscopes with a mechanical kinetic moment carrier, *Scientific readings on aviation, dedicated to the memory of N. E. Zhukovsky*, 2017, no. 5, pp. 534—543 (in Russian).

12. **Patent** 3225609 USA, MKI G01C, NKI 74-5.7. Two-axis Gyroscope, Priority 1962.

13. **Patent** 3408874 USA, MKI G01C, NKI 74-5. Two-axis, nonfloated ball bearing Gyroscope, Priority 1965.

14. **Patent** 3417627 USA, MKI G01C, NKI 74-5.6. Free-rotor gyro, Priority 19615.

15. **Patent** 3517562 USA, MKI G01C, NKI 74-5.6. Inertial Gyroscope,Priority 1967.

16. **Patent** 1473893 FRG, MKI G01C, NKI 42c, 25/51. Federgetriebener Kreisel, Priority 1970.

17. **Patent** 3019662 USA, MKI G01C, NKI 74-5.7. Gyroscopic Control Mechanism, Priority 1975.

18. **Patent** 7707452 France, MCI G05D 1/00//B 64G 1/100. La systeme gyroscopiques, Priority 1978.

19. **Patent** 4309005 USA, MKI F423 13/30, F4 1G7/22, NKI 244/3.16. Target seeking Gyro, Priority 1982.

20. **Rolling** bearings. Bearings of progressive designs. Special double-row spherical ball bearing: information sheet, Moscow, JSC NPO VNIIP, 1986, 21 p. (in Russian).

21. **Raspopov V. Ya.** Gyroscopes with ball—bearing suspension, Tula, Vulture and K, 2003, 175 p. (in Russian).

22. **Patent** 1345770 Russian Federation, IPC G01C 25/00. A device for technological running-in of a spherical ball bearing of a gyroscope / Andreev A. A., Gryaznov E. A., Freiman V. S., No.3978852/22; application 15.11.85; publ. 10.08.05, Bul. No.22.

23. **A. S.** 282956 USSR. Gyroscopic device / V. Ya. Raspopov, Yu.N. Oskin (USSR), No. 3177926; application 31.07.87; publ. 3.10.88.

24. **Patent** 2308680 Russian Federation, IPC G01C 19/02, G01P 9/04. Gyroscope (variants) / Guskov A. A., Makarov A. M., Gryaznov E. A., Urakova L. E., No. 2005137296/28; application 30.11.05; publ. 20.10.07, Byul. No.29.

25. **Patent** 2460040 Russian Federation, IPC G01C 19/02. Gyroscope (variants) / Makarov A. M., Kozhin V. V., Gryaznov E. A., Urakova L. E., Gorbachev V. M., No.2011109981/28; application 16.03.11; publ. 27.08.12, Bul. No. 24.

26. **Patent** 2446382 Russian Federation, IPC G01C 19/02. Gyroscope / Makarov A. M., Kozhin V. V., Gryaznov E. A., Urakova L. E., No. 2010133531/28; application 10.08.10; publ. 27.03.12, Bul. No.9.

27. **Patent** 2572501 Russian Federation, IPC G01C 25/00. Method of gyroscope drift correction and device for its implementation / Makarov A. M., Patrushev I. P., No.2014140387/28; application 06.10.14; publ. 10.01.16, Bul. No. 1.

28. **Mokrov A. P., Makarov A. M.** Small-sized gyroscope with spherical ball bearing suspension, *Interuniversity collection of articles based on the materials of the III All-Russian scientific and practical conference "Socio-economic and technical problems of the military-industrial complex"*, 2016, pp. 156—161 (in Russian).

29. **"... By** the name of "Progress". JSC "Michurin plant "Progress", Ryazan, Publishing house "IP Potapov V. S.", 2007, 216 p. (in Russian).

30. **Available at:** www.sagem-ds.com.

31. **Raspopov V. Ya., Malyutin D. M., Alaluev R. V., Telukhin S. V., Shepilov S. I.** Gyroscopic angle sensor with spherical ball bearing suspension with improved operational characteristics, *Gyroscopy and navigation,* 2018, vol. 26, no. 2 (101), pp. 88—94 (in Russian)**.**

32. **Raspopov V. Ya., Malyutin D. M., Ivanov Yu. V.** Gyroscopes in gyroscopic stabilization systems, *Handbook. Engineering magazine*, 2009, no. 7 (148), pp. 52—58 (in Russian).