

В. Я. РАСПОПОВ, Д. М. МАЛЮТИН, Р. В. АЛАЛУЕВ,
С. В. ТЕЛУХИН, С. И. ШЕПИЛОВ

ГИРОСКОПИЧЕСКИЙ ДАТЧИК УГЛОВ СО СФЕРИЧЕСКИМ ШАРИКОПОДШИПНИКОВЫМ ПОДВЕСОМ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Эксплуатационные характеристики гироскопических датчиков углов (ГДУ) с шарикоподшипниковым подвесом (ШПП), такие как детерминированная наводка от тока датчика момента на выходные цепи датчиков углов и скорость управляемого движения ротора, оказывают значительное влияние на работу контура стабилизации и управления гироскопической платформы. Эксплуатационные характеристики ГДУ могут быть улучшены за счет модернизации конструкции. Идея модернизации заключается в реализации независимых друг от друга электромагнитных цепей датчиков углов и моментов.

Ключевые слова: трехстепенной гироскоп, шарикоподшипниковый подвес, гироскопический датчик угла.

Введение

Электромеханические гироскопы с кардановым подвесом имеют самую продолжительную историю развития по сравнению с другими классами гироскопов [1].

В 60-х годах прошлого века за рубежом, особенно в США, началась активная работа по созданию гироскопов на базе трехстепенного гироскопа со сферическим ШПП (СШПП) – в качестве альтернативы гироскопам с кардановым подвесом. Были предложены многочисленные варианты конструктивных решений корректируемых и некорректируемых гироскопов с ШПП [2–5].

С конца 1970-х годов интерес к гироскопам с СШПП появился у отечественных разработчиков, который имел под собой вполне материальную основу в виде серии специальных двухрядных сферических шарикоподшипников, разработанных в НПО «ВНИИПП» [6].

Выпускаемые в настоящее время сферические шарикоподшипники имеют следующие основные характеристики:

Распопов Владимир Яковлевич. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Приборы управления», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». Заслуженный деятель науки РФ.

Малютин Дмитрий Михайлович. Кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Приборы управления», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Алалуев Роман Владимирович. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборы управления», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». Член секции молодых ученых международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Телухин Сергей Владимирович. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборы управления», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Шепилов Сергей Игоревич. Главный конструктор, АО «Мичуринский завод «Прогресс».

- частота вращения – до 1000 с^{-1} ;
- амплитуда колебаний, определяющая допускаемые углы прокачки ротора, – в пределах от $\pm 1^\circ$ до $\pm 25^\circ$;
- рабочая температура – до 150°C ;
- допустимое напряжение в зонах контакта шариков с опорными поверхностями – 210 МПа.

В работе [7] 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. Корректируемые ГДУ с СШПП работают в контуре стабилизации и управления гироплатформ с установленной на них полезной нагрузкой. В данном случае не требуется больших углов прокачки СШПП, при этом в режиме управления ротор должен иметь постоянную скорость вращения и необходимо обеспечить необходимые скорости прецессии гироскопа.

С конца 1970-х – начала 1980-х гг. начались отечественные разработки гироскопов с СШПП, которые продолжают до настоящего времени [8–14]. Эксплуатационные характеристики СШПП обеспечивают широкое применение гироскопов с этим типом подвеса, например в инклинометрах ИГН 73-100/80 разработки ПАО «Темп-Авиа», гиростабилизаторах оптической аппаратуры серий «С» и «ГС» [5], ГДУ для стабилизации оптико-электронной аппаратуры с большим увеличением.

При работе ГДУ в контуре управляемого гиростабилизатора оптико-электронной аппаратуры определяющее значение имеют такие эксплуатационные характеристики, как скорость управляемого движения (скорость прецессии) и точность показаний, зависящая от электромагнитных наводок в датчиках угла при работе датчиков момента. Решение вопросов увеличения скорости прецессии и уменьшения электромагнитных наводок в датчиках угла является целью данной статьи.

Уравнения движения гироскопа

Известные уравнения движения гироскопа с СШПП [1, 7], дополненные уравнениями датчиков углов и моментов, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} A\ddot{\alpha} + h\dot{\alpha} + m_{\pi}\alpha - H\dot{\beta} - m_{\text{рв}}\beta &= M_{\text{в}}^{\alpha} + M_{\text{у}}^{\alpha}, \\ A\ddot{\beta} + h\dot{\beta} + m_{\pi}\beta + H\dot{\alpha} + m_{\text{рв}}\alpha &= M_{\text{в}}^{\beta} + M_{\text{у}}^{\beta}, \\ M_{\text{у}}^{\alpha} &= U_{\text{у}}^{\alpha} K_{\text{у}}^{\alpha}, \\ M_{\text{у}}^{\beta} &= U_{\text{у}}^{\beta} K_{\text{у}}^{\beta}, \\ U_{\alpha} &= K(F)U_{\text{у}}^{\alpha} + \alpha K_{\alpha}, \\ U_{\beta} &= K(F)U_{\text{у}}^{\beta} + \beta K_{\beta}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где A – экваториальный момент инерции ротора, h – коэффициент демпфирования, m_{π} – перекрестный момент; $m_{\text{рв}}$ – радиально-восстанавливающий момент; $M_{\text{у}}^{\alpha}$, $M_{\text{у}}^{\beta}$ – управляющие моменты по соответствующим координатам;

M_B^α, M_B^β – возмущающие моменты по соответствующим координатам; U_y^α, U_y^β – напряжения управления по соответствующим координатам; K_y^α, K_y^β – коэффициенты передачи датчиков моментов; U_α, U_β – напряжения на выходе датчиков угла; $K(F)$ – коэффициент взаимовлияния цепей датчика момента гироскопа на цепь датчика угла; K_α, K_β – коэффициенты передачи датчиков угла, F – частота управляющего сигнала.

Как следует из уравнений (1), радиально-восстанавливающий момент приводит к прецессии гироскопа в направлении уменьшения углов α и β , а перекрестный – к их увеличению. В работе [7] выполнено исследование влияния этих моментов на уходы гироскопа и приведены результаты лабораторных испытаний.

Из уравнений (1) следует также, что при подаче управляющих напряжений на датчики моментов на выходе датчиков углов появляются наводки $K(F) \cdot U_y^\alpha(F_i)$ и $K(F) \cdot U_y^\beta(F_i)$, которые при включении гироскопа в контур системы управления платформой приводят к ошибкам стабилизации, зависящим от коэффициента взаимовлияния. Уменьшение коэффициента взаимовлияния приведет к уменьшению составляющей в сигналах датчиков углов, обусловленной работой датчиков момента.

Улучшение эксплуатационных характеристик гироскопов с СШПП

В известных конструкциях гироскопов с СШПП иностранных и отечественных разработчиков датчики угла и момента находятся по одну сторону ротора гироскопа и имеют единый магнитопровод [8, 10–13]. Вследствие этого при подаче управляющего сигнала на датчики момента возникает сигнал на выходе датчиков углов. Уменьшение взаимовлияния цепей датчиков момента на цепи датчиков угла может быть обеспечено за счет разнесения платы датчиков угла и платы датчиков моментов по разные стороны ротора и реализации индивидуального магнитопровода как для датчиков момента, так и для датчиков угла, а также алгоритмически путем исключения ряда дискрет выходного сигнала датчика угла в момент подачи управляющего сигнала. За счет незначительного увеличения массогабаритных параметров удастся улучшить указанные выше эксплуатационные характеристики гироскопа, имеющие важное значение для его работы в составе гиросtabilизаторов оптико-электронной аппаратуры. Подобная работа выполнена и экспериментально подтверждена на примере серийного прибора Д-7, широко применяемого в отечественных изделиях гироскопической техники.

Для решения перспективных задач применения гироскопа скорость управления датчика должна быть повышена до 120 °/с по каждой из моделируемых осей, в то время как в приборе Д-7 обеспечена скорость управления 90°/с. Увеличение скорости управления обеспечено за счет установки дополнительных катушек управления.

Конструкция модернизированного гироприбора приведена на рис. 1. Его основание представляет собой фланец, на котором под углом 45° к осям координат размещены четыре сердечника с катушками (их положение и число не изменялись), образующих статор I двухкоординатного индуктивного датчика угла.

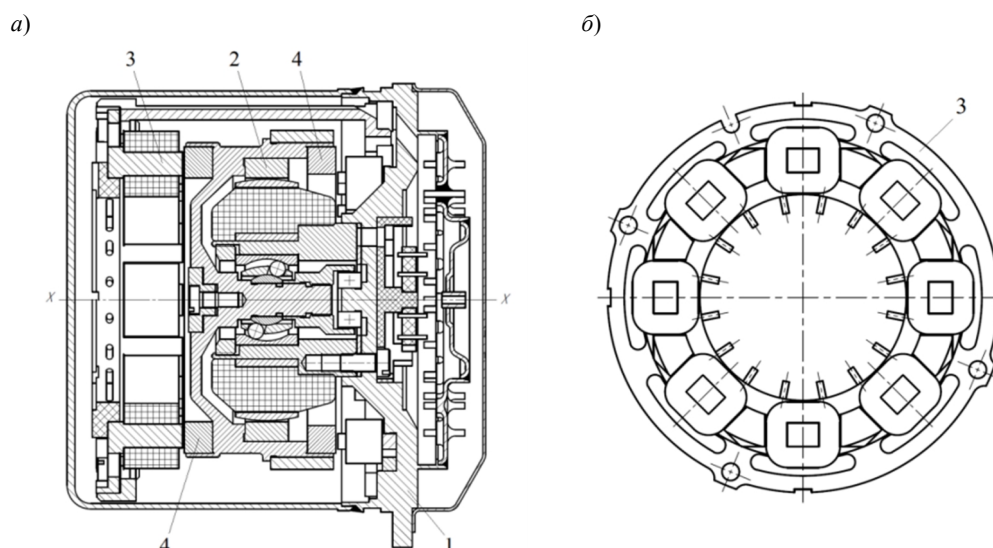


Рис. 1. Модернизированная конструкция гироскопа:
а – общий вид; б – расположение датчиков момента

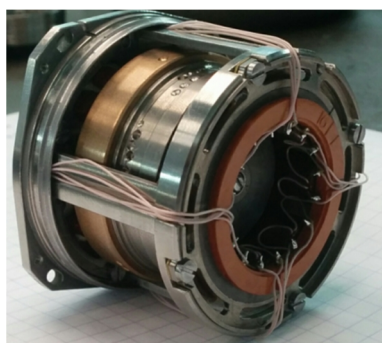


Рис. 2. Внешний вид модернизированного гироскопа (без кожуха)

Модернизация конструкции гироскопа заключалась в том, что датчики момента были перенесены на противоположную (относительно датчиков угла) сторону ротора 2 гироскопа и их число было увеличено с четырех до восьми. Датчики момента образованы на едином магнитопроводе, на котором с шагом 45° расположены восемь катушек датчиков момента, все они образуют статор 3 двухкоординатного датчика момента. На роторе 2 гироскопа было установлено второе ферритовое кольцо 4 (якорь двухкоординатного датчика момента). Внешний вид гироскопа представлен на рис. 2.

В результате модернизации осевой момент инерции ротора увеличился в 1,5 раза, что при повышении управляющего момента в 2 раза привело к увеличению скорости управления в 1,333 раза, которая составила $120^\circ/\text{с}$.

Значение коэффициента взаимовлияния $K(F)$ цепей датчика момента гироскопа на цепь датчика угла определено экспериментально путем подачи синусоидального сигнала на датчик момента гироскопа, расположенного неподвижно на лабораторном столе при нераскрученном роторе и фиксации выходного сигнала с датчика угла гироскопа.

На основании экспериментальных данных получены графики зависимости величины коэффициента взаимовлияния от частоты (рис. 3), рассчитанные по зависимости

$$K = \frac{U_\alpha(F_i)}{U_y^\alpha(F_i)} \cdot 100\%$$

для гироскопа Д-7 и модернизированного гироскопа.

Сравнение экспериментальных данных, полученных при исследовании гироскопа Д-7 и модернизированного гироскопа, позволяет сделать следующие выводы (рис. 3).

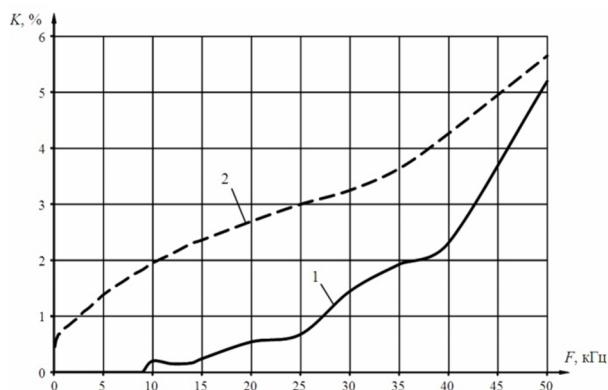


Рис. 3. График зависимости коэффициента взаимовлияния:
1 – модернизированный гироскоп; 2 – гироскоп Д-7

В области частот от 0 до 50 кГц для модернизированного гироскопа удастся существенно снизить коэффициент взаимовлияния по сравнению с аналогом. Например, на частоте 15 кГц коэффициент взаимовлияния модернизированного гироскопа в 9,9 раз меньше по сравнению с серийным образцом.

В области частот 0–8 кГц эффект взаимовлияния у модернизированного гироскопа практически отсутствует. На рис. 4 приведены графики выходного сигнала гироскопа Д-7 и модернизированного гироскопа при подаче синусоидального сигнала с частотой 15 кГц и амплитудой 800 мВ на датчик момента соответствующего гироскопа. Графики подтверждают снижение влияния электромагнитных процессов, протекающих в датчиках момента, на выходной сигнал в датчиках угла модернизированного гироскопа.

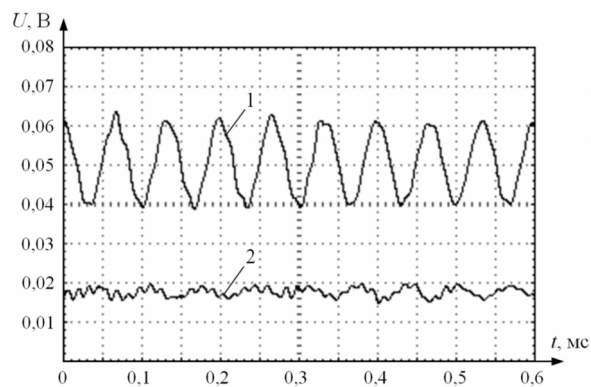


Рис. 4. Осциллограмма:
1 – сигнал с датчика угла гироскопа Д-7;
2 – сигнал с датчика угла модернизированного гироскопа

На рис. 5 приведены графики выходного сигнала гироскопа Д-7 и модернизированного гироскопа как реакция на периодический сигнал прямоугольной формы с частотой 250 Гц. Выходной сигнал датчика угла гироскопа при этом пропусклся через фильтр низких частот второго порядка с полосой пропускания 25 кГц. При этом амплитуда выходного сигнала модернизированного гироскопа

скопа в 2,7 раза, а время переходного процесса в 8 раз меньше, чем у гироскопа Д-7. Дрейф гироскопа, представляющий собой случайную величину, определяемую экспериментально, остался на прежнем уровне и составил $15^\circ/\text{ч}$.

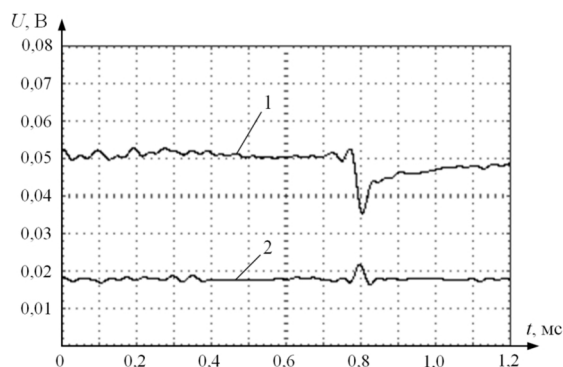


Рис. 5. Осциллограмма:

1 — сигнал с датчика угла гироскопа Д-7; 2 — сигнал с датчика угла модернизированного гироскопа

Закключение

1. Проведенная модернизация позволила за счет установки четырех дополнительных катушек управления повысить значение управляющего момента, определяющего скорость прецессии ротора гироскопа, и за счет разнесения платы датчиков угла и платы датчиков момента снизить влияние электромагнитных процессов, протекающих в датчиках момента, на выходной сигнал ГДУ в области частот 0–50 кГц.

2. В результате модернизации скорость прецессии повышена в 1,333 раза, составляющая выходного сигнала, обусловленная электромагнитной наводкой, уменьшена в 2,7 раза.

3. Улучшенные эксплуатационные характеристики гироскопа с СШПП достаточны для его применения в качестве ГДУ гироплатформ для стабилизации оптико-электронной аппаратуры с большим увеличением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В. Прикладная теория гироскопов: учебник. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2015. 315 с.
2. Пат. 1473893 ФРГ, МКИ G01C, НКИ 42с, 25/51. Federgetriebener Kreisel. Приоритет, 1970.
3. Пат. 3019662 США, МКИ G01C, НКИ 74-5.7. Gyroscopic Control Mechanism. Приоритет, 1975.
4. Пат. 7707452 Франция, МКИ G05D 1/00//B 64G 1/100. La systeme gyroscopiques. Приоритет, 1978.
5. Пат. 4309005 США, МКИ F423 13/30, F4 1G7/22, НКИ 244/3.16. Target seeking Gyro. Приоритет, 1982.
6. Подшипники качения. Подшипники прогрессивных конструкций. Специальный двухрядный сферический шарикоподшипник: информационный листок. М.: ОАО «НПО «ВНИИП», 1986.
7. Распопов В.Я. Гироскопы с шарикоподшипниковым подвесом. Тула: Гриф и К, 2003. 175 с.
8. 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.
9. А.с. 282956 СССР. Гироскопический прибор / В.Я. Распопов, Ю.Н. Оськин (СССР). № 3177926; заявл. 31.07.87; опубл. 3.10.88.
10. 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.
11. 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.

12. Патент 2446382 Российская Федерация, МПК G01C 19/02. Гироскоп / Макаров А.М., Кожин В.В., Грязнов Е.А., Уракова Л.Е. №2010133531/28; заявл. 10.08.10; опубл. 27.03.12, бюл. №9.
13. Патент 2572501 Российская Федерация, МПК G01C 25/00. Способ коррекции дрейфа гироскопа и устройство для его осуществления / Макаров А.М., Патрушев И.П. №2014140387/28; заявл. 06.10.14; опубл. 10.01.16, бюл. № 1.
14. **Мокров А.П., Макаров А.М.** Малогабаритный гироскоп со сферическим шарикоподшипниковым подвесом // Межвузовский сборник статей по материалам III всероссийской научно-практической конференции «Социально-экономические и технические проблемы оборонно-промышленного комплекса». 2016. С. 156–161.
15. «... По имени «Прогресс». Рязань: Изд-во «ИП Потапов В.С.», 2007. 216 с.

Raspopov V.Ya., Malyutin D.M., Alaluev R.V., Telukhin S.V. (Tula State University, Russia), and **Shepilov S.I.** (Michurinsk Plant Progress, JSC, Russia).

Gyroscopic Angle Sensor with Ball Bearing Suspension with Improved Performance Characteristics. *Giroskopiya i Navigatsiya*. 2018. Vol. 26. No. 2 (101). P. 88–94.

Abstract. The performance characteristics of gyroscopic angle sensors (GAS) with ball bearing suspension, such as determined magnetic pickup on angle sensor output circuits from torque motor currents, and rate of rotor's controlled motion, significantly influence the operation of gyroplatform stabilization and control circuit. The GAS performance characteristics can be improved by upgrading their design. The idea of upgrade consists in making the electromagnetic circuits of angle sensors and torque motors mutually independent.

Key words: three-degree-of-freedom gyroscope, ball bearing suspension, gyroscopic angle sensor.

REFERENCES

1. **Luk'yanov, D.P., Raspopov, V.Ya., and Filatov, Yu.V.**, *Prikladnaya teoriya giroskopov* (Applied Theory of Gyroscopes). Study book, Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, 2015.
2. Patent No. 1473893, FRG, Federgetriebener Kreisel, 1970.
3. Patent No. 3019662, USA, Gyroscopic Control Mechanism, 1975.
4. Patent No. 7707452, France, La systeme gyroscopiques, 1978.
5. Patent No. 4309005, USA, Target Seeking Gyro, 1982.
6. *Podshipniki kacheniya. Podshipniki progressivnykh konstruktssii. Spetsial'nyi dvukhryadnyi sfericheskii sharikopodshipnik: informatsionnyi listok* (Antifriction Bearings. Advanced Design of Bearings. Special Double-Row Spherical Ball Bearing: Information Bulletin), NPO VNIIP, JSC, Moscow, 1986.
7. **Raspopov, V.Ya.**, *Giroskopy s sharikopodshipnikovym podvesom* (Gyroscopes with Ball Bearing Suspension), *Grifi K*, Tula, 2003.
8. **Andreev, A.A., Gryaznov, E.A., and Freiman, V.S.**, Patent No. 1345770, Russian Federation, 2005.
9. **Raspopov, V.Ya., and Os'kin, Yu.N.**, Gyroscopic Device, Certificate of Authorship No. 282956, USSR, 1988.
10. **Gus'kov, A.A., Makarov, A.M., Gryaznov, E.A., and Urakova, L.E.**, Patent No. 2308680, Russian Federation, 2007.
11. **Makarov, A.M., Kozhin, V.V., Gryaznov, E.A., Urakova, L.E., and Gorbachev V.M.**, Patent No. 2460040, Russian Federation, 2012.
12. **Makarov, A.M., Kozhin, V.V., Gryaznov, E.A., and Urakova, L.E.**, Patent No. 2446382, Russian Federation, 2012.
13. **Makarov, A.M., and Patrushev, I.P.**, Patent No. 2572501, Russian Federation, 2016.
14. **Mokrov, A.P., and Makarov, A.M.**, Small-sized gyroscope with spherical ball bearing suspension, *Mezhvuzovskii sbornik trudov po materialam 3-i Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Sotsial'no-ekonomicheskie i tekhnicheskie problemy oboronno-promyshlennogo kompleksa* (Interuniversity Collection of Papers from Proc. of the 3rd Russian Research and Practical Conference "Social, Economic, and Engineering Issues of Defense Industries"), 2016, pp. 156–161.
15. *Po imeni "Progress"* (Progress Is Its Name), IP Potapov V.S., Ryazan', 2007.

Материал поступил 26.05.2017