

УДК 531.768

doi:10.21685/2072-3059-2021-4-8

Особенности проектирования высокочувствительного автокомпенсационного углового акселерометра с использованием оптронно-световодных элементов

А. И. Сорока¹, А. В. Колесников², К. П. Лихоеденко³,
Ю. А. Сидоркина⁴, А. А. Тунгушпаев⁵

^{1,2,3,4,5}Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

¹sorokaai@mail.ru, ²kolesnikov.a.v@bmstu.ru, ³kafsm5@bmstu.ru,
⁴sidyulia5968@bmstu.ru, ⁵tungushpaev@bmstu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является автокомпенсационный угловой акселерометр для систем угловой стабилизации, высокоточной навигации и наведения. Предметом исследования является методика проектирования автокомпенсационного углового акселерометра на торсионном подвесе с оптронным датчиком углового положения чувствительного элемента. Цель работы – расчет наиболее ответственных узлов высокоточного углового акселерометра автокомпенсационного типа, конструкция которого представлена в описании изобретения к авторскому свидетельству № 851136 «Преобразователь механических величин», удовлетворяющего техническим требованиям к авиационному и космическому приборостроению. *Материалы и методы.* Расчет наиболее ответственных узлов высокоточного углового акселерометра автокомпенсационного типа выполнен с использованием численных методов решения нелинейных уравнений, дифференциального и интегрального исчисления, математического моделирования. *Результаты.* Разработана методика проектирования наиболее ответственных узлов автокомпенсационного углового акселерометра, предназначенного для систем угловой стабилизации, высокоточной навигации и наведения. Выполнены расчеты механической колебательной системы, оптронного датчика углового положения чувствительного элемента, магнитной цепи и катушки обратной связи углового акселерометра. Проведен анализ устойчивости нелинейной системы с разделением ее на фазы медленного и быстрого движения (автоколебательный режим), определены ее основные характеристики. *Выводы.* Выполненные расчеты показали возможность построения предложенной конструктивной схемы высокоточного измерителя угловых ускорений, соответствующего по своим основным техническим характеристикам требованиям к авиационным датчикам автоматизированного контроля и регистрации параметров движения с одновременным упрощением его конструкции по сравнению с используемыми в настоящее время аналогами.

Ключевые слова: датчик угловых ускорений, автокомпенсационный угловой акселерометр, торсионный подвес, вибрация, оптический измеритель микроперемещений

Для цитирования: Сорока А. И., Колесников А. В., Лихоеденко К. П., Сидоркина Ю. А., Тунгушпаев А. А. Особенности проектирования высокочувствительного автокомпенсационного углового акселерометра с использованием оптронно-световодных элементов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 4. С. 94–107. doi:10.21685/2072-3059-2021-4-8

Features of designing a highly sensitive auto-compensating angular accelerometer using optocoupler-lightguide elements

A.I. Soroka¹, A.V. Kolesnikov², K.P. Likhoedenko³,
Yu.A. Sidorkina⁴, A.A. Tungushpaev⁵

^{1,2,3,4,5}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹sorokaai@mail.ru, ²kolesnikov.a.v@bmstu.ru, ³kafsm5@bmstu.ru,

⁴sidyulia5968@bmstu.ru, ⁵tungushpaev@bmstu.ru

Abstract. *Background.* The object of the research is an auto-compensating angular accelerometer for angular stabilization systems, high-precision navigation and guidance. The subject of the research is the method of designing an auto-compensating angular accelerometer on a torsion suspension with an optocoupler of the angular position of the sensitive element. The purpose of the work is to calculate the most critical components of a high-precision angular accelerometer of an auto-compensation type, the design of which is presented in the description of the invention to the copyright certificate No. 851136 “Converter of mechanical quantities”, satisfying technical requirements for aviation and space instrumentation. *Materials and methods.* The calculation of the most critical nodes of a high-precision angular accelerometer of an auto-compensation type was performed using numerical methods for solving nonlinear equations, differential and integral calculus, and mathematical modeling. *Results.* A technique has been developed for designing the most critical components of an auto-compensating angular accelerometer designed for systems of angular stabilization, high-precision navigation and guidance. The calculations of the mechanical oscillatory system, optocoupler sensor of the angular position of the sensitive element, magnetic circuit and feedback coil of the angular accelerometer are performed. An analysis of the nonlinear system’s stability with its division into phases of slow and fast motion (self-oscillating mode) is carried out, and its main characteristics are determined. *Conclusions.* The performed calculations showed the possibility of constructing the proposed design scheme of a high-precision angular acceleration meter that meets the requirements formulated for aviation sensors for automated control and registration of motion parameters in terms of its main technical characteristics and simplifying its design compared to currently used analogues.

Keywords: Angular acceleration sensor, auto-compensating angular accelerometer, torsion bar, vibration, optical meter small displacements

For citation: Soroka A.I., Kolesnikov A.V., Likhoedenko K.P., Sidorkina Yu.A., Tungushpaev A.A. Features of designing a highly sensitive auto-compensating angular accelerometer using optocoupler-lightguide elements. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;(4):94–107. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-4-8

Введение

В связи со 100-летним юбилеем со дня рождения в апреле 1921 г. академика РАН Александра Аркадиевича Красовского целесообразно отметить, что он впервые в мировой практике разработал и обосновал возможность практической реализации ряда моделей бортового гравитационного градиентометра авиационно-космического применения, а также инициировал исследования по созданию прецизионного углового акселерометра автокомпенсационного типа с использованием оригинальных оптоволоконных элементов.

Работы научной школы А. А. Красовского нашли дальнейшее развитие и совершенствование в исследованиях сотрудников кафедры СМ-5 МГТУ им. Н. Э. Баумана для их использования и реализации в перспективных

пилотажных навигационных комплексах летательных аппаратов авиакосмического использования, эффективной гравirazведки аномальных удельных плотностей месторождений земной коры, планет, астероидов, других тел и объектов.

При разработке и эксплуатации авиационной и космической аппаратуры возникает необходимость в высокоточной оценке угловых ускорений (в том числе виброускорений). Такие ускорения могут составлять в широком диапазоне частот (от долей до нескольких сотен Гц) единицы и десятки угловых секунд. В технике широко применяются датчики угловых ускорений [1], однако при решении многих задач их использование проблематично из-за недостаточного рабочего частотного диапазона, высокого порога чувствительности, значительных массогабаритных характеристик и низких метрологических свойств. В настоящее время приоритетными являются одноконтентные датчики, способные обеспечивать требуемые метрологические свойства в условиях действия многомерной вибрации [1, 2]. Известным и распространенным является компенсационный метод построения одноконтентных измерений угловых ускорений с использованием пространственно разнесенных линейных датчиков, преимущественно пьезоакселерометров. Взаимное сложение и вычитание сигналов линейных акселерометров позволяет выделить интересующую компоненту колебаний. Описанные в литературе многочисленные конструкции датчиков угловых ускорений [3, 4] обладают следующими недостатками: сравнительно небольшой частотой собственных колебаний чувствительного элемента (ЧЭ) от 30 до 50 Гц, жидкостным или воздушным демпфированием ЧЭ, индуктивным датчиком углового положения ЧЭ, которые в целом приводят к нестабильности и к уменьшению ресурса безотказной работы такого типа измерителей. Известна конструктивная схема измерителя угловых ускорений [5], в которой с целью устранения нестабильности паразитного момента токопередающего узла применен бесконтактный оптронный токопередающий узел. Однако данное устройство для измерения моментов сил и ускорений не обеспечивает требуемой точности и надежности измерений вследствие нестабильности работы датчика углового положения чувствительности элемента, слабой помехозащищенности оптронного токопередающего узла и недостаточной устойчивости механической колебательной системы к воздействию инерционных вибрационных и ударных перегрузок.

Таким образом, учитывая основные положительные характеристики известных конструктивных схем измерителей угловых ускорений [6], а также определенные недостатки в каждом из рассмотренных типов угловых акселерометров, была разработана конструктивная схема автокомпенсационного углового акселерометра (АУА) [7], удовлетворяющая ОСТ 100683–89 по техническим требованиям к бортовым датчикам для автоматизированного контроля и регистрации параметров, представленным в табл. 1.

Измеритель работает в автоколебательном режиме компенсационного измерителя угловых ускорений, что позволяет уменьшить, в зависимости от частоты и амплитуды автоколебаний, в десятки и сотни раз влияние сухого трения в подшипниковых опорах чувствительного элемента, приравнивая их по механической чувствительности к торсионным подвесам и, следовательно, позволяет существенно упростить конструкцию механической колебательной системы измерителя угловых ускорений.

Таблица 1

Параметр	Значение параметра
1. Диапазон измерения углового ускорения, c^{-2}	от 0,1 до 100,0
2. Разрешающая способность, c^{-2}	0,01
3. Время регулирования, с	0,05
4. Собственная частота, Гц	100
5. Диапазон рабочих температур, $^{\circ}C$	от -60 до +60
6. Масса, не более, г	150
7. Ресурс работы, не менее, ч	500
8. Высотность, км	30
9. Вибрационные перегрузки:	
а) ускорение, не менее, m/c^2	50
б) диапазон частот, Гц	от 1 до 300
10. Ударные перегрузки:	
а) ускорение, не менее, m/c^2	120
б) длительность, мс	от 20 до 50

Для конструктивной схемы АУА [7] была разработана методика расчета наиболее ответственных узлов и систем АУА, предусматривающая следующие этапы:

- 1) расчет механической колебательной системы измерителя;
- 2) расчет датчика углового положения чувствительного элемента АУА;
- 3) расчет магнитной цепи и катушки обратной связи АУА;
- 4) исследование динамических процессов измерителя угловых ускорений.

Расчет механической колебательной системы измерителя

Согласно табл. 1 кривая опоры чувствительного элемента углового акселерометра должна соответствовать установленным техническим требованиям к его конструкции по вибрационным перегрузкам в $50 m/c^2$ и по ударным перегрузкам в $120 m/c^2$. С целью определения статических и динамических характеристик измерителя угловых ускорений были определены моменты инерции чувствительного элемента относительно трех ортогональных осей X , Y , Z и рассчитаны кривые опоры чувствительного элемента.

Степень асимметрии чувствительного элемента составила:

$$S = \frac{J_z - J_y}{J_x} = 0,962.$$

Учитывая, что для выбранных материалов (агат и кобальт-вольфрамовый сплав) максимально допустимое напряжение на поверхности соприкосновения керна и подпятника $\sigma = 5 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$, используя [8], определили фактическое значение этого параметра в условиях ударных и вибрационных перегрузок, которое для ударных перегрузок составило $\sigma_{\max}^{\text{уд}} = 0,7 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$, а для вибрационных $\sigma_{\max}^{\text{вб}} = 4,5 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$.

Таким образом, чувствительный элемент разработанного углового акселерометра выдерживает достаточно сильные вибрационные перегрузки в $50 m/c^2$ с частотой 300 Гц и амплитудой 1 мм и ударные перегрузки в $120 m/c^2$ с запасом в 7 раз.

Расчет оптронного датчика углового положения чувствительного элемента измерителя угловых ускорений

В настоящее время достигнута практически одинаковая пороговая чувствительность оптических и емкостных индикаторов микроперемещений в 10^{-11} мм [9]. Однако какая при этом получена точность измерений, поскольку не указаны пределы измерений или диапазон контролируемых микроперемещений, определить трудно. Кроме того, для выделения полезного сигнала, пропорционального пороговому смещению в 10^{-11} мм, в радиотехническом и оптическом индикаторе микроперемещений требуется время в 200–300 с.

Поэтому при выборе типа системы съема полезного сигнала в проектируемых прецизионных гравиинерциальных датчиках следует отдать предпочтение оптическим индикаторам микроперемещений, обладающим значительно меньшим динамическим влиянием на механические колебательные системы по сравнению с радиотехническими индикаторами, при прочих равных с ними характеристиках.

Относительно достигнутой экспериментально пороговой чувствительности оптических измерителей микроперемещений известно [9], что измерители, сконструированные с использованием законов геометрической оптики, типа разнообразных оптических микроскопов, имеют пороговую чувствительность от 0,2 до 0,5 мкм; измерители, изготовленные с использованием принципов волновой оптики, типа измерительных дифракционных решеток и интерферометров, имеют пороговую чувствительность от 10 до 1 нм; измерители, принцип работы которых основан на использовании квантовых свойств света, типа фотометрических растровых [10, 11] и интерференционных [12] модуляторов света, имеют пороговое разрешение от 1 до 0,1 пм при необходимом времени выделения порогового сигнала порядка 1 с.

Следует заметить, что модуляционные растрово-интерференционные индикаторы микроперемещений, обладая повышенной чувствительностью к минимальным пороговым перемещениям достаточным быстродействием, требуют специальной калибровки выходного аналогово-цифрового сигнала, чтобы установить масштабное соответствие между величиной фактически измеренного микроперемещения и величиной выходного электрического сигнала. При этом целесообразно использовать лазерный модуляционный интерферометр типа Фабри-Перо, работающий на различных фиксированных частотах излучения стабилизированного лазера и имеющий наибольшую допустимую чувствительность к ультрамикроперемещениям в 10^{-14} мм [12].

Таким образом, для проектируемых прецизионных гравиинерциальных датчиков с относительной ошибкой измерений от 10^{-4} до 10^{-5} в системе индикации и выделения полезного сигнала целесообразно применять оптический индикатор микроперемещений механического воспринимающего элемента типа оптронного [11], имеющего пороговую чувствительность от 10 до 1 пм в диапазоне контролируемых микроперемещений от 2 до 5 мкм, имеющий аналогово-цифровой выход и быстродействие от 0,1 до 0,5 с, предназначенный для микроминиатюрного исполнения и пригодный для эксплуатации в условиях промышленного или бортового уровня вибраций и перегрузок.

Для первых линейных измерений с коаксиальными датчиками микроперемещений получим следующее выражение для светового потока [11]:

$$F_2 = F_1 \cdot \left(1 - \frac{(\Delta + q)^2}{(\Delta + 2D \operatorname{tg} \alpha)^2} \right), \quad (1)$$

где Δ – радиус светопроводящей жилы центрального световода; q – толщина светоизолирующей оболочки центрального световода; F_1 – световой поток светоизлучателя; F_2 – световой поток на входе фотоприемника; α – апертура выходного световода; D – измеряемое микроперемещение.

В соответствии с формулой (1) и принятыми параметрами оптронного датчика ($\Delta = 100 \cdot 10^{-6}$ м, $q = 20 \cdot 10^{-6}$ м, $\alpha = 45^\circ$ и $F_1 = 30$ лм) получим его статическую характеристику $F_2 = F_1(D)$ (рис. 1). На рис. 2 представлена световая характеристика фотоприемника типа КФД-10 при сопротивлении нагрузки $R_n = 200$ Ом, интегральной чувствительности $S = 3 \cdot 10^{-3}$ А/лм, темновом токе $J_T = 5 \cdot 10^{-9}$ А и площадью светочувствительной площадки $2 \cdot 10^{-6}$ м².

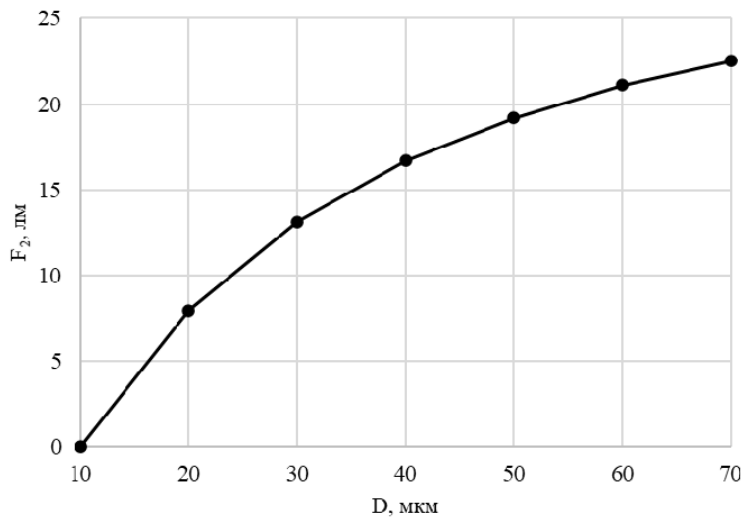


Рис. 1. Статическая характеристика оптронного датчика

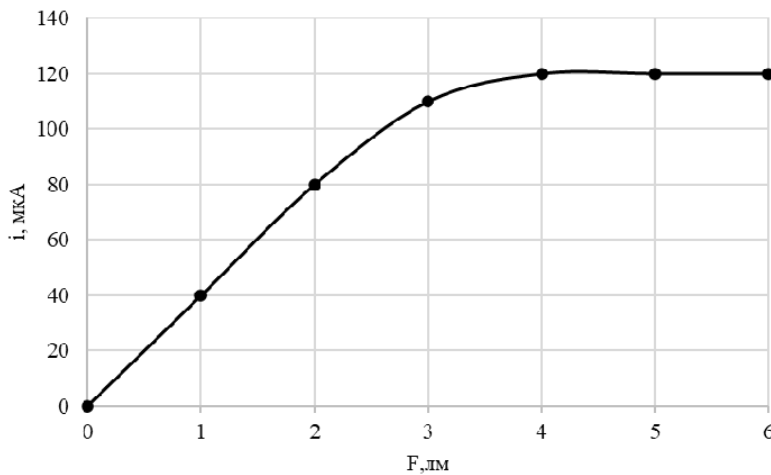


Рис. 2. Световая характеристика фотоприемника типа КФД-10

Имея световую характеристику и статическую характеристику оптического датчика перемещений, можно рассчитать выходную характеристику двух дифференциально включенных датчиков перемещений (рис. 3).

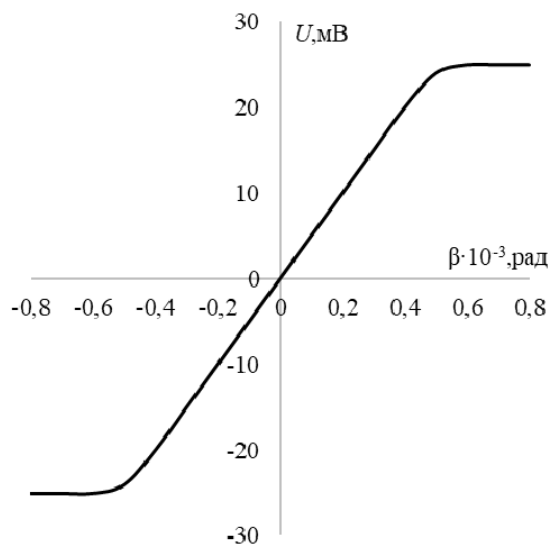


Рис. 3. Выходная характеристика двух дифференциально включенных датчиков перемещений

Используя выходную характеристику (рис. 3), получили требования к амплитуде колебаний чувствительного элемента, так как рабочий режим фотоприемника (линейная часть графика) составляет 0,4 мрад.

Расчет магнитной цепи и катушки обратной связи углового акселерометра

В измерителе помимо автоколебательного режима одновременно используется принцип компенсации входного полезного сигнала, позволяющий ослабить эксплуатационные погрешности измерений из-за изменения температуры и напряжения питания, а также из-за старения элементов электронной схемы; расширить диапазон амплитуд и частот измеряемого сигнала; корректировать амплитудно-частотные характеристики измерителя в резонансной области и использовать электромагнитное демпфирование чувствительного элемента.

Конструкция магнитной цепи разработанного акселерометра включает в себя постоянный магнит из материала ЮНДК-24, который имеет высокую коэрцитивную силу [13], магнитопровод и сердечник из сплава 76 НХД, который имеет высокую проницаемость в слабых магнитных полях, а также обладает повышенной температурной стабильностью в интервале температур от минус 60 до плюс 60 °С, что способствует уменьшению тепловых шумов углового измерителя.

Магнитная проводимость для потоков [14]:

$$G_B = \mu b \left[\frac{a}{b} + 0,52 \left(1 + \frac{a}{b} \right) + 0,308 \frac{\delta}{b} \right],$$

где μ – магнитная проницаемость воздуха; b – длина полюсного наконечника; a – высота полюсного наконечника; G_B – магнитная проводимость рабочего воздушного зазора; δ – расстояние между полюсами магнита (воздушный зазор).

Индукция в среднем значении магнита H_o может быть определена по кривой размагничивания (рис. 4).

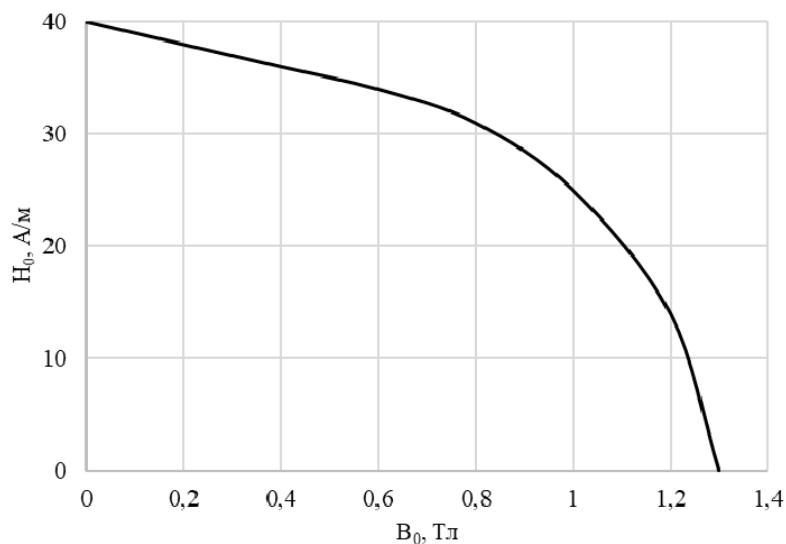


Рис. 4. Кривая размагничивания

Для расчета цепи обратной связи необходимо рассчитать индуктивность катушки L обратной связи и магнитную индукцию B_δ в рабочем зазоре по следующим формулам:

$$L = \frac{0,32 \cdot 10^{-4} R^2 \omega^{*2}}{6R + 9l + 10d},$$

где R – средний радиус катушки; l – длина катушки; d – толщина катушки; ω^* – число витков катушки.

Определим магнитную индукцию в рабочем зазоре:

$$B_\delta = \frac{B_o S_M}{\sigma S \delta},$$

где σ – коэффициент рассеяния; δ – расстояние между полюсами магнита (воздушный зазор); S_M – поперечное сечение полюса магнитопровода; S – поперечное сечение рабочего тела.

Исследование динамических процессов измерителя угловых ускорений

Структура статических характеристик оптронного датчика углового положения показывает, что его структурную схему можно представить нелинейным элементом с характеристикой типа «ограничение» [15]. Такая характеристика датчика угловых положений является следствием конструктивных особенностей используемых коаксиальных световодов и существованием ре-

жима насыщения в полупроводниковых фотоприемниках, работающих в вентильном режиме.

Анализ нелинейной системы заключается в разделении ее медленного и быстрого движения [15]. Под быстрым движением здесь понимается автоколебательный режим при условии равенства нулю входного сигнала. Под медленным движением понимается процесс в системе с линеаризованным элементом и входным сигналом, не равным нулю.

Нелинейная система, в которой при определенных условиях возникают автоколебания, будет работоспособной, если только их амплитуда не превышает некоторой допустимой величины, а частота колебаний находится в определенных пределах. Поэтому параметры автоколебаний – амплитуда и частота – являются основными характеристиками системы.

Частоту автоколебаний ω_0 можно рассчитать, используя уравнение баланса фаз [16]:

$$\arg W_{\text{нч}}(i\omega) = \arg \frac{K_3 K_2 K_1}{(T_2 i\omega + 1)(T_1 i\omega + 1)i\omega} = 0^\circ - 90^\circ - \arctg T_2 \omega - \arctg T_1 \omega = -\pi.$$

Амплитуда автоколебаний рассчитывается из уравнения баланса амплитуд:

$$\frac{B}{a} W_{\text{н}}(A) |W_{\text{нч}}(i\omega)| = 1.$$

В результате анализа годографа линейной части был сделан вывод об устойчивости автоколебаний углового акселерометра:

$$\begin{aligned} W(i\omega) &= \frac{K_3 K_2 K_1}{(T_2 i\omega + 1)(T_1 i\omega + 1)i\omega} = \\ &= \frac{K_3 K_2 K_1 \omega^2 (T_2 + T_1)}{\omega^4 (T_2 + T_1)^2 + (\omega - T_2 T_1 \omega^3)^2} + i \frac{\omega - T_2 T_1 \omega^3}{\omega^4 (T_2 + T_1)^2 + (\omega - T_2 T_1 \omega^3)^2}. \end{aligned}$$

Для определения устойчивости медленного движения был использован критерий Рауса – Гурвица [16]. Передаточная функция для анализа медленного движения имеет вид

$$W(p) = \frac{Jk_1 k_4 (T_2 + 1)}{T_1 T_2 p^3 + p^2 (T_1 + T_2) + p + K_1 K_2 K_3 K_4}.$$

Для проверки устойчивости разработанной системы необходимо выполнение условия $T_1 + T_2 - K_1 K_2 K_3 K_4 T_1 T_2 > 0$.

Определим точность характеристики системы. При этом следует учесть, что в разомкнутом тракте имеется одно интегрирующее звено. Согласно структурному признаку астатизма оно является астатической системой первого порядка по отношению к заданному воздействию, т.е. точно обрабатывает только постоянный входной сигнал.

Исследуем динамические свойства системы. При этом инерционностью звена $\frac{K_3 K_2}{T_2 p + 1}$ в первом приближении можно пренебречь по сравнению с инерционностью подвижной части (чувствительного элемента) углового акселерометра. В этом случае передаточная функция замкнутой системы будет иметь следующий вид:

$$W(p) = \frac{JK_1 K_4}{T_1 p^2 + p + K_1 K_2 K_3 K_4}. \quad (2)$$

Корни характеристического уравнения замкнутой системы (2) комплексные, следовательно процесс носит затухающий колебательный характер.

Переходный процесс системы при единичном, ступенчатом возмущении и при нулевых условиях имеет следующий вид [16]:

$$U(t) = K \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-c^2}} e^{-c\omega_0 t} \sin(\sqrt{1-c^2} \omega_0 t + \arctg \frac{1}{c} \sqrt{1-c^2}) \right]. \quad (3)$$

На основании графика переходной функции, построенной по выражению (3), были получены следующие характеристики системы:

- время регулирования – 4 мс;
- время достижения первого максимума – 0,94 мс;
- перерегулирование – 45 %;
- минимальный полезный сигнал (при $\dot{\omega} = 0,1 \text{ с}^{-2}$) – 20 мкВ.

Заключение

Выполненные в данной статье расчеты показали возможность построения предложенной рациональной конструктивной схемы измерителя угловых ускорений, соответствующей по своим основным техническим характеристикам требованиям, сформулированным к авиационным датчикам автоматизированного контроля и регистрации параметров движения.

Отличительной особенностью предложенной конструкции измерителя угловых ускорений является тот факт, что помимо автоколебательного режима одновременно используется принцип компенсации входного полезного сигнала, позволяющий ослабить эксплуатационные погрешности измерений из-за изменения температуры и напряжения питания, а также из-за старения элементов электронной схемы; расширить диапазон амплитуд и частот измеряемого сигнала; корректировать амплитудно-частотные характеристики измерителя в резонансной области и использовать электромагнитное демпфирование чувствительного элемента.

Опыт изготовления и экспериментальные исследования наиболее ответственного узла разработанного углового акселерометра – оптронно-световодного датчика углового положения чувствительного элемента, полученные при участии автора данной работы в процессе испытаний отдельных образцов оптронных измерителей микроперемещений, показали, что такие датчики достаточно технологичны в изготовлении, просты в наладке, юстировке и эксплуатации, и обладают высокой чувствительностью к измерению

угловых перемещений в 0,001 угл.с и погрешностью в 0,01–0,1 % от диапазона измерений.

Реализация разработанного измерителя угловых ускорений при современном уровне технологии прецизионного авиационного приборостроения не составляет особых затруднений.

Список литературы

1. Датчики теплофизических и механических параметров : справочник в 3 т. Т. 1 / под ред. Ю. Н. Коптева. М. : ИПРЖР, 1999. 548 с.
2. Коновалов С. Ф. [и др.]. Температурные дрейф и нестабильность нулевого сигнала маятниковых компенсационных акселерометров // XXVII Санкт-Петербургская междунар. конф. по интегрированным навигационным системам : сб. материалов (Санкт-Петербург, 25 мая – 5 июня 2020 г). СПб. : Концерн «Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор"», 2020. С. 237–243.
3. Benser E. T. Trends in inertial sensors and applications // 2015 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS) Proceedings, Napuna Beach, HI, USA, 2015. P. 1–4. doi:10.1109/ISISS.2015.7102358
4. Patent USA, Cl. MKI G 01P 15/08, № 3494204 Accelerometer producing a linear electrical output / Whitehead H. S. 10.02.1970.
5. А. с. 562738 СССР, МКИ G 01 L 3/14. Устройство для измерения моментов, сил и ускорений / Р. В. Александров, В. И. Моргунов, Л. Н. Орлов (СССР). № 2320046/10 ; заявл. 02.02.1976 ; опубл. 25.06.1977, Бюл. № 23. 2 с.
6. Корниенко А. Н., Горяева М. О. Исследование конструктивной схемы однокомпонентного акселерометра компенсационного типа на магниторезонансном подвесе. М. : Инженерный вестник, 2017. № 1. С. 24–30.
7. А. с. 851136 СССР, МПК G 01 L 3/14. Преобразователь механических величин / А. А. Красовский, А. И. Сорока, В. В. Черкашин (СССР). № 2866555 ; заявл. 07.01.1980 ; опубл. 30.07.1981, Бюл. № 28. 5 с.
8. Вибрации в технике : справочник в 6 т. Т. 3 / под ред. Ф. М. Дименетберга, К. С. Колесникова. М. : Машиностроение, 1980. 544 с.
9. Дитчберн Р. Физическая оптика : пер. с англ. / под ред. И. А. Яковлева. М. : Наука, 1965. 631 с.
10. Jones R. V. Some developments and applications of the optical lever // Journal of scientific instruments. 1961. Vol. 38 (2). P. 37–45.
11. Сорока А. И. Оптронно-световодные датчики перемещений чувствительных элементов гравиметрических измерительных систем // Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение : доклады науч.-техн. конф. (Менделеево, 14–15 февраля 2017 г.). Менделеево : Всерос. науч.-исследов. ин-т физ.-техн. и радиотехн. измерений, 2017. С. 283–290.
12. Карташев А. А., Эцин И. Ш. Методы измерения малых изменений разности фаз в интерференционных устройствах // Успехи физических наук. 1972. Т. 107, № 4. С. 687–721.
13. Чередниченко И. В. [и др.] Структура и свойства сплавов для постоянных магнитов ЮНДК25БА, полученных методом направленной кристаллизации с жидкоталлическим охладителем // Труды ВИАМ. 2017. № 11 (59). С. 29–36.
14. Буль О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM. М. : Академия, 2005. 336 с.
15. Drazenovic D. The Invariance Conditions in Variable Structure Systems. Automatica, Pergamon Press, 1969. Vol. 5 (3). P. 287–295.
16. Юревич Е. И. Теория автоматического управления. 3-е изд. СПб. : БХВ-Петербург, 2007. 560 с.

References

1. Koptev Yu.N. (ed.). *Datchiki teplofizicheskikh i mekhanicheskikh parametrov: spravochnik v 3 t. T. 1. = Sensors of thermophysical and mechanical parameters: reference book in 2 volumes. Volume 1.* Moscow: IPRZhR, 1999:548. (In Russ.)
2. Konovalov S.F. [et al.] Temperature drift and zero signal instability of pendulum compensation accelerometers. *XXVII Sankt-Peterburgskaya mezhdunar. konf. po integrirovannym navigatsionnym sistemam: sb. materialov (Sankt-Peterburg, 25 maya – 5 iyunya 2020 g)* = The 27th Saint-Petersburg international conference on integrated navigation systems: proceedings (Saint Petersburg, May 25 – June 5, 2020). Saint Petersburg: Kontsern «Tsentral'nyy nauchno-issledovatel'skiy institut "Elektropribor"», 2020:237–243. (In Russ.)
3. Benser E.T. Trends in inertial sensors and applications. *2015 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS) Proceedings*, Hapuna Beach, HI, USA, 2015:1–4. doi: 10.1109/ISISS.2015.7102358
4. Patent USA, Cl. MKI G 01P 15/08, № 3494204 *Accelerometer producing a linear electrical output*. Whitehead H. S. 10.02.1970.
5. A. s. 562738 SSSR, MKI G 01 L 3/14. Device for measuring moments, forces and accelerations. R.V. Aleksandrov, V.I. Morgunov, L.N. Orlov (SSSR). No. 2320046/10; appl. 02.02.1976; publ. 25.06.1977, bull. No. 23:2. (In Russ.)
6. Kornienko A.N., Goryaeva M.O. *Issledovanie konstruktivnoy skhemy odnokomponentnogo akselerometra kompensatsionnogo tipa na magnitorezonansnom podvese = The research of the design scheme of a single-component compensating type accelerometer on a magnetic resonance suspension*. Moscow: Inzhenernyy vestnik, 2017;(1):24–30. (In Russ.)
7. A. s. 851136 SSSR, MPK G 01 L 3/14. Converter of mechanical quantities. A.A. Kravoskiy, A.I. Soroka, V.V. Cherkashin (SSSR). No. 2866555; appl. 07.01.80; publ. 30.07.1981, bull. No. 28:5. (In Russ.)
8. Dimenetberg F.M., Kolesnikov K.S. (eds.). *Vibratsii v tekhnike: spravochnik v 6 t. T. 3 = Vibrations in technology: reference book in 6 volumes. Volume 3*. Moscow: Mashinostroenie, 1980:544. (In Russ.)
9. Ditchbern R. *Fizicheskaya optika: per. s angl. = Physical optics.: translated from English*. Moscow: Nauka, 1965:631. (In Russ.)
10. Jones R.V. Some developments and applications of the optical tever. *Journal of scientific instruments*. 1961;38(2):37–45.
11. Soroka A.I. Optocoupler-lightguide sensors of displacements of sensitive elements of gravel measuring systems. *Navigatsiya po gravitatsionnomu polyu Zemli i ee metrologicheskoe obespechenie: doklady nauch.-tekhn. konf. (Mendeleevo, 14–15 fevralya 2017 g.) = Navigation on the gravitational field of the Earth and its metrological support: proceedings of scientific anf engineering conference (Mendeleevo, February 14–15, 2017)*. Mendeleevo: Vseros. nauch.-issledov. in-t fiz.-tekhn. i radiotekhn. izmereniy, 2017:283–290. (In Russ.)
12. Kartashev A.A., Etsin I.Sh. *Metody izmereniya malykh izmeneniy raznosti faz v interferentsionnykh ustroystvakh = Methods for measuring small changes in phase difference in interference devices*. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1972;107(4):687–721. (In Russ.)
13. Cherednichenko I.V. [et al.] Structure and properties of alloys for permanent magnets YuNDK25BA, obtained by the method of directional crystallization with a liquid-metal cooler. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*. 2017;(11):29–36. (In Russ.)
14. Bul' O.B. *Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov. Magnitnye tsepi, polya i programma FEMM = Methods for calculating the magnetic systems of electrical apparatus. Magnetic circuits, fields and the FEMM program*. Moscow: Akademiya, 2005:336. (In Russ.)

15. Drazenovic D. *The Invariance Conditions in Variable Structure Systems*. Automatica, Pergamon Press, 1969;5(3):287–295.
16. Yurevich E.I. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. 3-e izd. = Theory of automatic control: the 3rd edition*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2007:560. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Иванович Сорока

инженер Научно-исследовательского института специального машиностроения, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1)

E-mail: sorokaai@mail.ru

Aleksandr I. Soroka

Engineer of the Research Institute of Special Engineering, Bauman Moscow State Technical University (building 1, 5 the 2nd Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Александр Владимирович Колесников

аспирант, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1)

E-mail: kolesnikov.a.v@bmstu.ru

Aleksandr V. Kolesnikov

Postgraduate student, Bauman Moscow State Technical University (building 1, 5 the 2nd Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Константин Павлович Лихоеденко

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры СМ-5, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1)

E-mail: kafsm5@bmstu.ru

Konstantin P. Likhoedenko

Doctor of engineering sciences, professor, professor of the sub-department SM-5, Bauman Moscow State Technical University (building 1, 5 the 2nd Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Юлия Анатольевна Сидоркина

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры СМ-5, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1)

E-mail: sidyulia5968@bmstu.ru

Yuliya A. Sidorkina

Doctor of engineering sciences, associate professor, professor of the sub-department SM-5, Bauman Moscow State Technical University (building 1, 5 the 2nd Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Артем Альбертович Тунгушпаев

аспирант, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1)

E-mail: tungushpaev@bmstu.ru

Artem A. Tungushpaev

Postgraduate student, Bauman Moscow State Technical University (building 1, 5 the 2nd Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 26.10.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 23.11.2021

Принята к публикации / Accepted 14.12.2021