

ВИБРАЦИОННАЯ ОШИБКА ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ

М.Е. Грушин
Ю.Ю. Колбас

mihail.grushin1968@gmail.com
tigma-e@rambler.ru

АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований устойчивости лазерных гироскопов к механической вибрации. Показано, что в лазерных гироскопах существует два механизма возникновения вибрационного дрейфа нуля — конусное движение направления оси чувствительности и расстройка периметра резонатора. Рассмотрены особенности возникновения дрейфов нуля при вибрации в гироскопах с магнитооптической и вибрационной частотными подставками. Показаны пути уменьшения или компенсации дрейфов нуля. Установлена возможность использования оптимально построенных лазерных гироскопов с магнитооптической частотной подставкой без амортизации, в отличие от лазерных гироскопов с вибрационной частотной подставкой. Приведены результаты экспериментальных исследований лазерных гироскопов с магнитооптической частотной подставкой

Ключевые слова

Лазерный гироскоп, дрейф нуля, вибрация, расстройка периметра резонатора, направление измерительных осей

Поступила в редакцию 13.10.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Механизм возникновения вибрационной ошибки лазерных гироскопов.

В настоящее время лазерные гироскопы (ЛГ) нашли широкое применение в бесплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС) различных видов [1–3].

К современным БИНС предъявляются требования повышения точности и автономности в условиях механических ударов и вибрации. С точки зрения параметров гироскопа это означает сохранение точности как по дрейфу, так и по погрешности масштабного коэффициента и положению измерительных осей.

Рассмотрим влияние вибрации на масштабный коэффициент ЛГ. Перемещение зеркал резонатора ЛГ под воздействием вибрации приводит к изменению периметра резонатора ЛГ, а также к расстройке его относительно центра контура усиления.

Как известно, масштабный коэффициент ЛГ k определяется формулой

$$k = \frac{\lambda L}{4Sn}, \quad (1)$$

где λ — длина волны генерации лазера; L — периметр лазера; S — площадь, охваченная оптическим контуром лазера; n — коэффициент преломления света в ак-

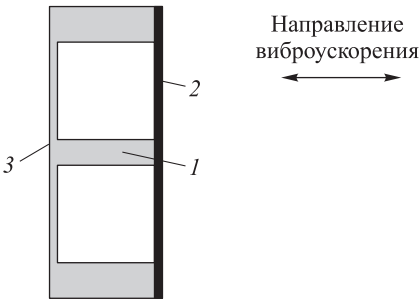


Рис. 1. Конструкция зеркала лазера с пьезоприводом:

1 — зеркало (стекло); 2 — пьезокерамический толкатель; 3 — отражающая поверхность зеркала

тивной среде (с учетом затягивания мод при расстройке от центра контура усиления). Перемещению в наибольшей степени подвержены зеркала с пьезоприводом (рис. 1), так как они имеют тонкую мембрану.

Зеркала лазера имеют достаточно жесткую конструкцию и их перемещение под воздействием виброускорений составляет не более 0,3 нм/г.

Для четырехзеркальной конструкции лазера в наихудшем случае под воздействием вибрации зеркала движутся в противофазе (рис. 2).

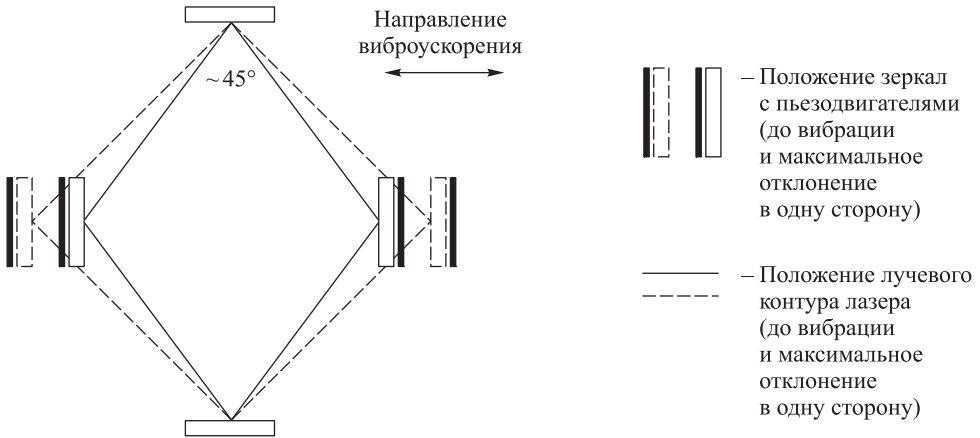


Рис. 2. Изменение лучевого контура лазера при вибрации:

— до вибрации; - - - — максимальное отклонение в одну сторону

Поскольку остальные два зеркала практически неподвижны, происходит изменение длины периметра ЛГ на $\Delta L = 0,6\sqrt{2}$ нм/г или $\sim 0,013\lambda$ при виброударном ускорении 10 г. На геометрические размеры резонатора L и S столь малое отклонение не влияет, а вот значение n зависит от расстройки периметра ЛГ от центра контура усиления прямо пропорционально зависимости коэффициента усиления G [4]. С учетом приведенной в [5] зависимости усиления от расстройки можно записать:

$$\frac{\Delta k}{k} = 1 - \frac{G}{G_0} \approx 1 - e^{-\ln 2 \left(\frac{c}{\lambda \Delta \nu_D} \right)^2 \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right)^2}, \quad \text{причем } \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta L}{L}, \quad (2)$$

где Δk — изменение масштабного коэффициента; ΔL — изменение периметра резонатора из-за вибрации; $\Delta \nu_D$ — полуширина контура усиления гелий-неонового лазера ($\sim 1,7 \cdot 10^9$ Гц); c — скорость света ($\sim 3 \cdot 10^8$ м/с).

Поскольку отношение $(\Delta L / L)^2$ мало, разложим правую часть уравнения (2) в ряд Тейлора, ограничившись членом первого порядка:

$$\frac{\Delta k}{k} \approx \ln 2 \frac{c^2}{(\Delta v_D \lambda)^2} \left(\frac{\Delta L}{L} \right)^2. \quad (3)$$

Параметр ΔL прямо пропорционален виброударному ускорению, поэтому относительная ошибка масштабного коэффициента пропорциональна квадрату ускорения.

Для длины периметра лазера $L = 0,28$ м и $\Delta L \approx 0,9 \cdot 10^{-8}$ м при ударном ускорении 10g получаем $\frac{\Delta k}{k} \approx 5 \cdot 10^{-5}$ отн. ед. Величина весьма значительная. Для ударных ускорений в 100g она возрастает до $5 \cdot 10^{-3}$, что делает показания ЛГ на время воздействия ускорения недостоверными. В связи с этим следует избегать маневров с большими угловыми скоростями в моменты, когда изделие может подвергнуться ударам.

При синусоидальной вибрации, которая продолжается длительное время, значение имеет не максимальное, а среднее относительное отклонение масштабного коэффициента за период вибрации:

$$\overline{\frac{\Delta k}{k}} = v \int_0^{1/v} \ln 2 \frac{c^2}{(\Delta v_D \lambda)^2} \left(\frac{\Delta L \sin(2\pi vt)}{L} \right)^2 dt = \ln 2 \frac{c^2}{2(\Delta v_D \lambda)^2} \left(\frac{\Delta L}{L} \right)^2 = \frac{\Delta k}{2k}, \quad (4)$$

где v — частота вибрации.

Отметим два решения проблемы устойчивости ЛГ к ударам и вибрациям — ужесточение мембраны пьезозеркала и уменьшение постоянной времени системы регулировки периметра с тем, чтобы успеть компенсировать расстройку периметра при ударах и вибрациях.

Также подвержены влиянию ударов и вибрации дрейф нуля и положение измерительных осей.

В настоящее время существуют два типа ЛГ — с вибрационной и магнито-оптической подставками [6]. Вибрационная подставка предполагает использование механического подвеса резонатора гироскопа, на котором с частотой 300...800 Гц колеблется резонатор ЛГ. При воздействии вибрации в таком ЛГ возникают угловые колебания направления оси чувствительности ЛГ относительно оси виброподвеса и линейные колебания положения зеркал резонатора.

Существует две конструкции виброподвесов: отдельная для каждого ЛГ и общая для трехосной сборки ЛГ.

В первой конструкции ось виброподвеса совпадает с осью чувствительности ЛГ, во второй — направлена к ней под углом 45°.

В момент времени t частота биений встречных волн на выходе ЛГ

$$f = f_0 \sin \frac{2\pi}{T} t \cos \theta, \quad (5)$$

где f_0 — амплитуда частотной подставки; T — период колебаний виброподвеса (период коммутации частотной подставки); θ — угол между осями виброподвеса и чувствительности ЛГ.

При воздействии внешней вибрации с частотой ν угловые колебания между направлением оси виброподвеса и осью чувствительности ЛГ равны

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta \sin(2\pi\nu t + \varphi_0), \quad (6)$$

где θ_0 — угол между осью виброподвеса и измерительной осью ЛГ при отсутствии вибрации; $\Delta\theta$ — амплитуда колебаний угла между осями виброподвеса и чувствительности ЛГ; φ_0 — начальная фаза внешней вибрации.

Формула (6) описывает ошибку ориентации измерительной оси ЛГ на виброподвесе при внешней вибрации. Отметим, что в лазерах с магнитооптической подставкой эта ошибка отсутствует, так как резонатор жестко закреплен в конструкции ЛГ.

Найдем дрейф нуля, вызванный внешней вибрацией. Из формул (5) и (6) определим, что в момент времени t частота биений встречных волн на выходе ЛГ

$$f = f_0 \sin \frac{2\pi}{T} t \cos(\theta_0 + \Delta\theta \sin(2\pi\nu t + \varphi_0)). \quad (7)$$

Поскольку значение $\Delta\theta$ небольшое, разложим косинус в ряд Тейлора в окрестностях θ_0 и ограничимся первыми тремя членами разложения:

$$f = f_0 \sin \frac{2\pi}{T} t (\cos \theta_0 - \sin \theta_0 \Delta\theta \sin(2\pi\nu t + \varphi_0) - \frac{1}{2} \cos \theta_0 \Delta\theta^2 \sin^2(2\pi\nu t + \varphi_0)). \quad (8)$$

Первый член описывает частоту биений встречных волн при отсутствии вибрации и интеграл от него обращается в нуль каждый момент времени, кратный T . Вторым и третьим членами описывают влияние вибрации. Тогда сдвиг частоты биений из-за вибрации за период коммутации частотной подставки равен

$$\Delta\Omega_B = \frac{f_0 \int_0^T \sin \frac{2\pi}{T} t (\cos \theta_0 - \sin \theta_0 \Delta\theta \sin(2\pi\nu t + \varphi_0) - \frac{1}{2} \cos \theta_0 \Delta\theta^2 \sin^2(2\pi\nu t + \varphi_0)) dt}{T} =$$

$$= \frac{f_0}{2\pi} \Delta\theta \frac{1}{(1 - \nu^2 T^2)} \cos(\pi\nu T + \varphi_0) \sin(\pi\nu T) (\sin\theta_0 + \cos\theta_0 \Delta\theta \cos(\pi\nu T) \sin(\pi\nu T + \varphi_0)). \quad (9)$$

В трехосных приборах используют два варианта виброподвеса — свой для каждого ЛГ или общий для сборки из трех ЛГ. В первом случае угол θ_0 мал и результат уравнения (8) можно записать в виде

$$\Delta\Omega_B = \frac{f_0}{2\pi} \Delta\theta \frac{1}{(1 - \nu^2 T^2)} \cos(\pi\nu T + \varphi_0) \sin(\pi\nu T) (\theta_0 + \Delta\theta \cos(\pi\nu T) \sin(\pi\nu T + \varphi_0)) \approx$$

$$\approx \frac{f_0}{16\pi} \Delta\theta^2 \frac{1}{(\nu^2 T^2 - 1)} (\cos(4\pi\nu T + 2\varphi_0) - \cos(2\varphi_0)). \quad (10)$$

В случае $\varphi_0 = 0$ имеем

$$\Delta\Omega_B = \frac{f_0}{16\pi} \Delta\theta^2 \frac{1}{(v^2T^2 - 1)} (\cos(4\pi vT) - 1) = \frac{f_0}{8\pi} \Delta\theta^2 \frac{\sin^2(2\pi vT)}{(1 - v^2T^2)}. \quad (11)$$

Как следует из формул (10) и (11), ошибка пропорциональна квадрату амплитуды колебаний угла между осью виброподвеса и осью чувствительности ЛГ (т. е. квадрату виброускорения) и убывает с увеличением произведения vT , имея максимумы (по модулю) при $vT = m / 4$, где m — целые нечетные числа от 1 до ∞ . В случае $\varphi_0 \neq 0$ положение максимумов ошибки сдвигается, но характер ее зависимости от vT остается прежним (рис. 3, а).

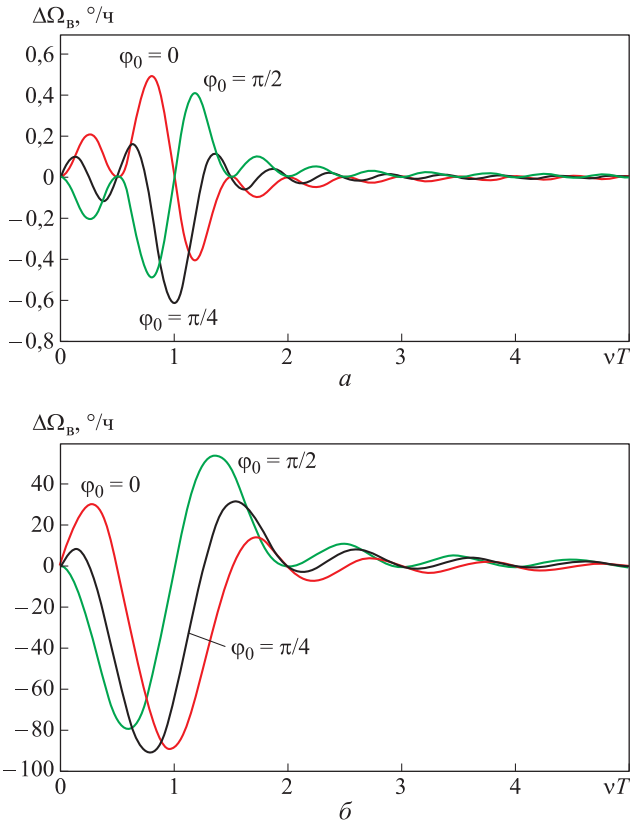


Рис. 3. Зависимость вибрационного дрейфа ($\Delta\Omega_B$) ЛГ на виброподвесе от vT ($f_0 = 50$ кГц; $\Delta\theta = 0,01$ при $\theta_0 = 0$ (а) и $\theta_0 = 45^\circ$ (б))

Особая точка $v = 1 / T$. Для нее

$$\Delta\Omega_B = \lim_{v \rightarrow 1/T} \left(\frac{f_0}{8\pi} \Delta\theta^2 \frac{\sin^2(2\pi vT)}{(1 - v^2T^2)} \right) = \frac{f_0}{16\pi} \Delta\theta^2 \lim_{v \rightarrow 1/T} \left(\frac{\sin^2(2\pi(1 - vT))}{(1 - vT)} \right) = 0. \quad (12)$$

Если же используется единая вибрационная подставка для трех ЛГ, измерительные оси ЛГ располагаются так, чтобы частотная подставка по всем осям была одинакова, что соответствует $\theta_0 = 45^\circ$, тогда

$$\Delta\Omega_B = \frac{\sqrt{2}f_0}{4\pi} \Delta\theta \frac{1}{(1-v^2T^2)} \cos(\pi vT + \varphi_0) \sin(\pi vT) (1 + \Delta\theta \cos(\pi vT) \sin(\pi vT + \varphi_0)). \quad (13)$$

График уравнения (13) приведен на рис. 3, б.

При $\varphi_0 = 0$ уравнение (13) упрощается:

$$\begin{aligned} \Delta\Omega_B &= \frac{\sqrt{2}f_0}{8\pi} \Delta\theta \frac{1}{(1-v^2T^2)} \sin(2\pi vT) \left(1 + \frac{\Delta\theta}{2} \sin(2\pi vT)\right) \approx \\ &\approx \frac{\sqrt{2}f_0}{8\pi} \Delta\theta \frac{1}{(1-v^2T^2)} \sin(2\pi vT). \end{aligned} \quad (14)$$

Сравним уравнения (11) и (14). Ошибка в (14) также убывает с увеличением произведения vT имея максимумы (по модулю) при $vT = m / 4$, где m — целые нечетные числа от 1 до ∞ . Однако значения этих максимумов оказываются в $\frac{2\sqrt{2}}{\Delta\theta}$ раз больше. В особой точке $v = 1 / T$ получим

$$\Delta\Omega_B = \frac{\sqrt{2}f_0}{8} \Delta\theta. \quad (15)$$

Из результатов, приведенных на рис. 3, следует, что конструкция из трех ЛГ на едином виброподвесе значительно менее устойчива к внешней вибрации, чем ЛГ с индивидуальными виброподвесами. При использовании единой вибрационной подставки для трех ЛГ при $f_0 = 50$ кГц и $\Delta\theta = 0,01$ (виброускорение 10 g) величина дрейфа ($\Delta\Omega_B$) достигает 88 °/ч (см. рис. 3, б).

Модуляция длины периметра резонатора с линейной поляризацией при отсутствии угловых колебаний не приводит к дрейфу нуля ЛГ, поскольку обе встречные волны испытывают одинаковое затягивание к центру одного контура усиления.

При наличии угловых колебаний, например при использовании вибрационной подставки, из-за вибрационных колебаний длины периметра резонатора значение масштабного коэффициента в соседних полупериодах вибрационной подставки оказывается разным. Следовательно, и частота биений встречных волн оказывается разной, что и приводит к возникновению дрейфа нуля ЛГ.

Отклонение частоты биений встречных волн при наличии вибрации от частоты биений без вибрации Ω в момент времени t можно найти из уравнения

$$\begin{aligned} \Delta\Omega_B &= \frac{1}{T} \int_0^T (\Omega_B - \Omega) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{\Delta k}{k} \Omega \right) dT = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \ln 2 \frac{c^2}{(\Delta v_D \lambda)^2} f_0 \left(\frac{\Delta L \sin(2\pi v t + \varphi_0) + \Delta L_0}{L} \right)^2 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) dt, \end{aligned} \quad (16)$$

где T — период виброподставки; f_0 — амплитуда виброподставки; ΔL — амплитуда вибрационного изменения периметра; ν — частота вибрации; ΔL_0 — статическое изменение периметра (статическая расстройка).

Интегрируя (16), найдем $\Delta\Omega_B$:

$$\Delta\Omega_B = \pi \ln 2 \frac{c^2}{(\Delta\nu_D \lambda)^2} f_0 \Delta L / L^2 (\Delta L / 2 (\cos(4\pi\nu T + 2\varphi_0) - \cos 2\varphi_0) / (1 - (2\nu T)^2) - \Delta L_0 (\sin(2\pi\nu T + \varphi_0) - \sin \varphi_0) / (1 - (\nu T)^2)). \quad (17)$$

На рис. 4 представлена зависимость $\Delta\Omega_B$ от νT (расчеты проведены по формуле (17)).

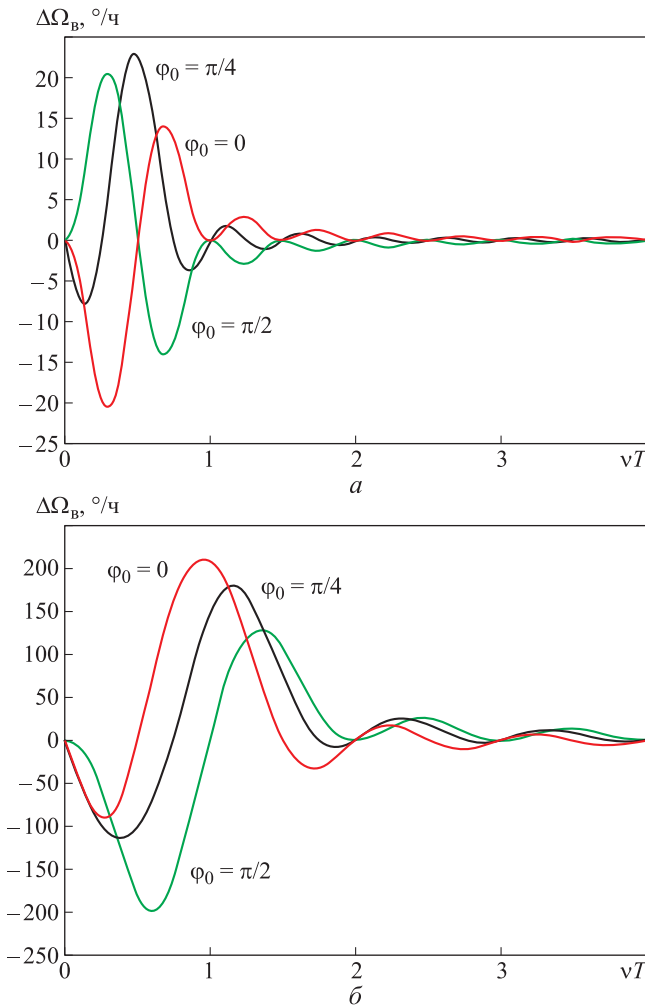


Рис. 4. Зависимость вибрационного дрейфа нуля ($\Delta\Omega_B$) ЛГ на виброподвесе от νT для разных значений φ_0 ($f_0 = 50$ кГц; $\Delta\nu_D = 1,7 \cdot 10^9$ Гц):

$$a - \Delta L / L = 0,013 \quad \lambda / L = 0,013 \cdot 632,8 \cdot 10^{-9} / 0,2 = 41,132 \cdot 10^{-9}; \quad \Delta L_0 / L = 0;$$

$$b - \Delta L_0 / L = 0,06 \cdot \lambda / L = 189,84 \cdot 10^{-9}$$

Совсем иной характер носит вибрационный дрейф ЛГ с магнитооптической (зеemanовской) подставкой. В нем нет колебаний измерительной оси ЛГ относительно оси виброподвеса. Однако, поскольку в нем происходит затягивание встречных волн к центрам разных контуров усиления, расстройка периметра приводит к возникновению дрейфа ЛГ, так как при переключении магнитного поля положения встречных волн по частотам оказываются разными.

В результате согласно [5] зависимость частоты подставки f от расстройки периметра при наложении одного и того же знакопеременного магнитного поля описывается функцией

$$f = f_0 (1 - \chi \Delta\lambda_{\pi}^2), \tag{18}$$

где f_0 — амплитуда частотной подставки; χ — константа, зависящая от амплитуды частотной подставки, усиления активной среды, уровня потерь в резонаторе; $\Delta\lambda_{\pi} = \frac{\Delta L}{\lambda} \sin(2\pi\nu t + \varphi_0) + \Delta\lambda_0$ — относительная расстройка периметра от вибрации зеркал, выраженная в долях длины волны генерации лазера.

Частотная подставка в зеemanовском лазере не синусоидальная, а прямоугольная:

$$f = \begin{cases} f_0 & \text{при } 0 \leq t < T/2; \\ -f_0 & \text{при } T/2 \leq t < T. \end{cases} \tag{19}$$

Сначала рассмотрим случай отсутствия статической расстройки — $\Delta\lambda_0 = 0$. Тогда дрейф от вибрации зеркал $\Delta\Omega_3$ рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} \Delta\Omega_3 &= \frac{f_0 \left(\int_0^{T/2} \left[1 - \chi \left(\frac{\Delta L}{\lambda} \sin(2\pi\nu T + \varphi_0) \right)^2 \right] dt - \int_{T/2}^T \left[1 - \chi \left(\frac{\Delta L}{\lambda} \sin(2\pi\nu t + \varphi_0) \right)^2 \right] dt \right)}{T} = \\ &= \frac{f_0 \chi \left(\frac{\Delta L}{\lambda} \right)^2}{T} \frac{1}{2\pi\nu} \sin(2\pi\nu T + 2\varphi_0) \sin^2(\pi\nu T). \end{aligned} \tag{20}$$

График уравнения (20) приведен на рис. 5, а.

Дополнительный дрейф убывает с увеличением частоты вибраций и пропорционален квадрату расстройки периметра, т. е. квадрату виброускорения. При частоте вибраций, кратной частоте коммутации подставки, дрейф равен нулю. При частоте вибрации, полукратной частоте коммутации подставки, дрейф равен

$$\Delta\Omega_3 = \pm \frac{f_0 \chi}{m 2\pi} \left(\frac{\Delta L}{\lambda} \right)^2 \sin(2\varphi_0), \tag{21}$$

где m — число, равное отношению частоты вибраций к частоте коммутации подставки. Отметим, что при φ_0 , равном нулю или кратном $\pi/2$, ошибка также равна нулю.

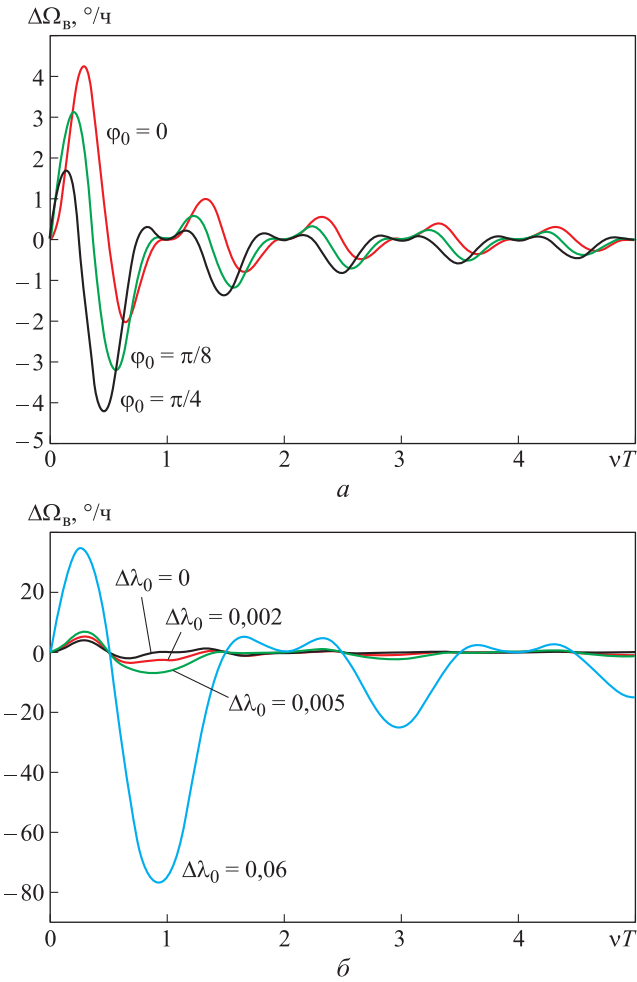


Рис. 5. Зависимость дрейфа от вибрации зеркал $\Delta\Omega_{\text{в}}$ от νT ЛГ с магнитооптической (зеemanовской) подставкой при $f_0 = 50$ кГц, $\Delta L / \lambda = 0,013$, $\chi = 1,5$ (а, б) и статической расстройке $\Delta l_0 \varphi_0 = 0$ (б)

Оценим значение вибрационного дрейфа. Для низкочастотной вибрации $t = 0,5$, $f_0 = 50$ кГц, $\Delta L / \lambda = 0,013$ (виброускорение 10g), $\chi = 1,5$, $\Delta\Omega_{\text{в}} = 4$ °/ч (см. рис. 5, а).

Отметим, что этот дрейф нуля носит магнитный характер [7] и при использовании четырехчастотного режима вычитается полностью, а квазичетырехчастотного — уменьшается в 2 раза.

Однако ситуация становится иной при наличии статической расстройки, связанной с неидеальной работой электронных блоков настройки периметра, наводок и т. п.

При наличии статической расстройки $\Delta\lambda_0$ уравнение (20) следует переписать в виде

$$\Delta_{\text{мсрп}} = \frac{f_0 \left(\int_0^{T/2} \left[1 - \chi \left(\frac{\Delta L \sin(2\pi\nu t + \varphi_0)}{\lambda} + \Delta\lambda_0 \right)^2 \right] dt - \int_{T/2}^T \left[1 - \chi \left(\frac{\Delta L \sin(2\pi\nu t + \varphi_0)}{\lambda} + \Delta\lambda_0 \right)^2 \right] dt \right)}{T} =$$

$$= \frac{f_0 \chi \left(\frac{\Delta L}{\lambda} \right)^2}{T} \frac{1}{2\pi\nu} \sin(2\pi\nu T + 2\varphi_0) \sin^2(\pi\nu T) -$$

$$- \frac{f_0 \chi}{T} \frac{\Delta L \Delta\lambda_0}{\pi\nu\lambda} \left(\cos(2\pi\nu T + \varphi_0) + \cos\varphi_0 - 2\cos(\pi\nu T + \varphi_0) \right). \quad (22)$$

Таким образом, зависимость вибрационного дрейфа от статической расстройки (последний член в формуле (22)) носит линейный характер и имеет максимум, равный $4f_0\chi \frac{\Delta L \Delta\lambda_0}{m\pi\lambda} \cos\varphi_0$ при $\nu = m/T$, где m — целое число. График уравнения (22) для разных значений статической расстройки ($\Delta\lambda_0$) приведен на рис. 5, б.

Для низкочастотной вибрации $m = 1$, $f_0 = 50$ кГц, $\Delta L / \lambda = 0,013$ (виброускорение 10g), $\Delta\lambda_0 = 0,005$, $\chi = 1,5$ и $\Delta\Omega_{\text{в}} = 7^\circ/\text{ч}$.

Для проверки полученных теоретических зависимостей вибрационной ошибки от параметров внешнего воздействия были проведены экспериментальные исследования зависимости дрейфа нуля ЛГ с вибрационной и зеemanовской частотными подставками от частоты и амплитуды вибрации для трех направлений вибрации — одно в направлении оси чувствительности ЛГ и два поперек.

В качестве экспериментального образца с вибрационной частотной подставкой был выбран одиночный цифровой ЛГ GD116 (производство FACRI, Китай, частота вибрационной подставки 740 Гц), а ЛГ с зеemanовской частотной подставкой — одиночный зеemanовский ЛГ К-5 (производство АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», частота коммутации магнитного поля 250 Гц). Лазерный гироскоп GD116 имеет в своем составе виброподвес, фотоприемники преобразования выходного светового сигнала лазера в электрический, систему преобразования электрического сигнала в цифровой код, блок питания. Выходная информация ЛГ передается с частотой 4 кГц, масштабный коэффициент (дискрета) составляет 0,8". Для включения ЛГ К-5 использовался выносной электронный блок, содержащий генератор прямоугольного знакопеременного тока, создающего магнитное поле на газоразрядных промежутках лазера, фотоприемники преобразования выходного светового сигнала лазера в электрический, систему преобразования электрического сигнала в цифровой код, блок питания. Выходная информация ЛГ передается с частотой 250 Гц, масштабный коэффициент (дискрета) составляет 0,65". Подробная блок-схема включения зеemanовского кольцевого лазера К-5 приведена в [4].

Испытания на воздействие вибрации проводились на вибростенде LDS V830-335 в диапазоне частот 20...2000 Гц. Скорость изменения частоты

вибрации — полоктавы в минуту. В качестве тензодатчиков использовались датчики PCB352 C04. Амплитуда воздействия для К-5 варьировалась от 2g до 10g. При испытаниях датчика GD116 на виброподвесе амплитуда вибрации не превышала 4g вследствие того, что большие значения воздействий могли привести к выходу его из строя.

Датчики, установленные в кубе, испытывались после предварительного прогрева перед механическим воздействием в течение 120 мин.

Экспериментальные зависимости дрейфа нуля ЛГ с вибрационной и зеemannовской частотными подставками от частоты вибрации для трех направлений вибрации приведены на рис. 6 и 7; на рис. 6, б показан дрейф нуля ЛГ с вибрационной частотной подставкой в увеличенном масштабе по вертикальной оси.

На рис. 8 показаны зависимости модулей максимумов дрейфов от виброускорений ЛГ с вибрационной (рис. 8, а) и зеemannовской (рис. 8, б) частотной подставкой.

Как видно на рис. 6–8, экспериментальные результаты соответствуют ранее приведенным теоретическим расчетам.

Из полученных результатов следует, что наибольший вклад в вибрационное смещение нуля как для датчиков на виброподвесе, так и с магнитооптической подставкой, вносит статическое изменение периметра (статическая расстройка). Этот факт подтверждает линейный характер зависимости максимумов дрейфа от амплитуды виброускорения (см. рис. 8).

Вибрационный дрейф имеет максимумы при ν кратных и полукратных $1/T$, причем наибольшие максимумы для ЛГ с магнитооптической частотной подставкой находятся на нечетных гармониках (см. рис. 7).

Интерес представляет узость пиков вибрационного дрейфа — теоретически их ширина должна быть больше, по-видимому, это связано с угловыми колебаниями зеркал при вибрации, которые в представленной математической модели не рассматриваются.

Также следует отметить, что максимум вибрационного дрейфа ЛГ с вибрационной частотной подставкой наблюдается при $\nu T \approx 1,6...1,7$ (см. рис. 5, а). Это может быть обусловлено положением собственной первой гармоники виброподвеса датчика.

Для ЛГ с вибрационной подставкой возможности уменьшения чувствительности дрейфов нуля к механической вибрации сильно ограничены невозможностью перехода на более жесткий виброподвес (падает амплитуда частотной подставки) и по этой же причине невозможностью увеличения частоты виброподвеса. В результате единственный путь — введение механической амортизации блока ЛГ в БИНС, в которой установлены ЛГ, причем верхняя частота пропускания таких амортизаторов должна быть в половину меньше частоты виброподвеса. Обычно такие амортизаторы выполняют из резины с внутренним металлическим кордом типа АКСС-М [8]. Это сильно ухудшает динамические характеристики БИНС, что особенно важно для подвижных объектов.

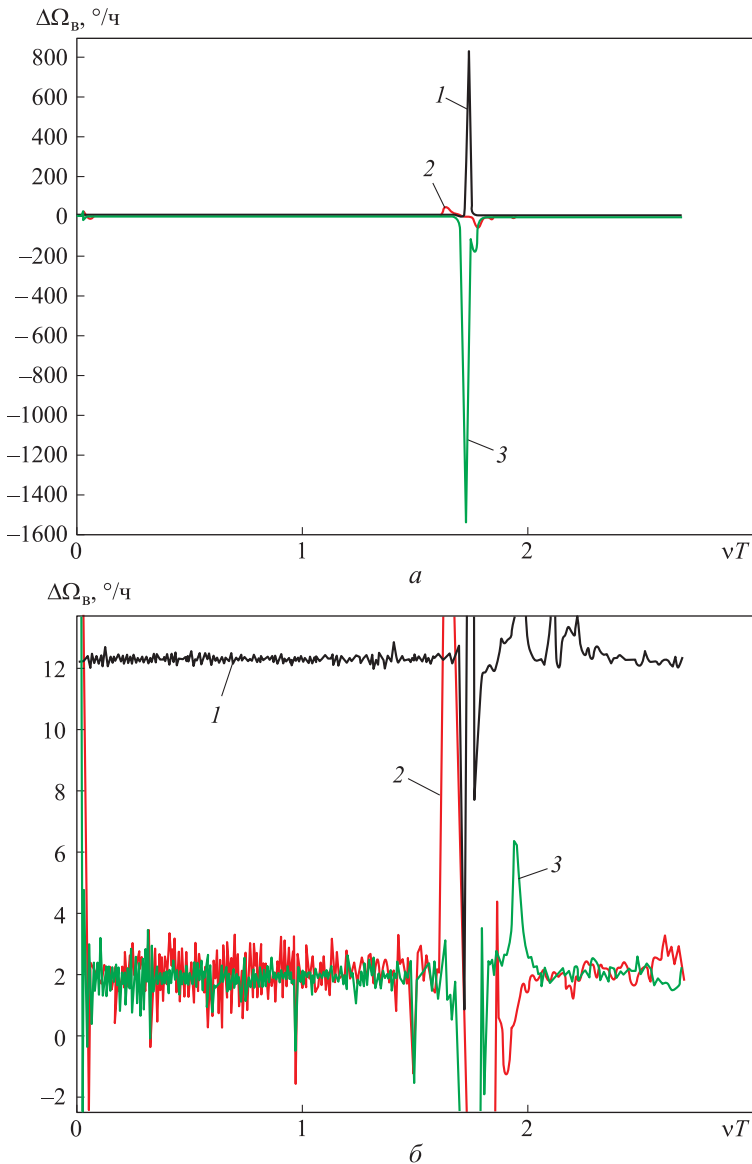


Рис. 6. Зависимость дрейфа нуля $\Delta\Omega_{\text{в}}$ ЛГ на виброподвесе от νT при наличии статической расстройки $\Delta\lambda_0$ ($f_0 = 50$ кГц; виброускорение равно $3g$; $\chi = 1,5$; $\Delta\lambda_0 = \Delta L_0 / \lambda = 0,06$; φ_0 — неизвестна и меняется в процессе эксперимента):

1 — направление перемещения платформы вибростенда перпендикулярно плоскости резонатора ЛГ; 2 и 3 — направление перемещения платформы вибростенда параллельно и перпендикулярно плоскости пьезозеркал

Эти недостатки не имеют ЛГ с магнитооптической подставкой. В таких приборах имеются все возможности для повышения частоты коммутации подставки более верхней границы существующих частот вибрации. В ЛГ в четырехчастотном режиме (примером такого прибора является Zero-Lock фирмы

Northrop-Grumman, США) чувствительности к вибрации вообще нет из-за отсутствия знакопеременной частотной подставки и полной компенсации магнитного дрейфа нуля.

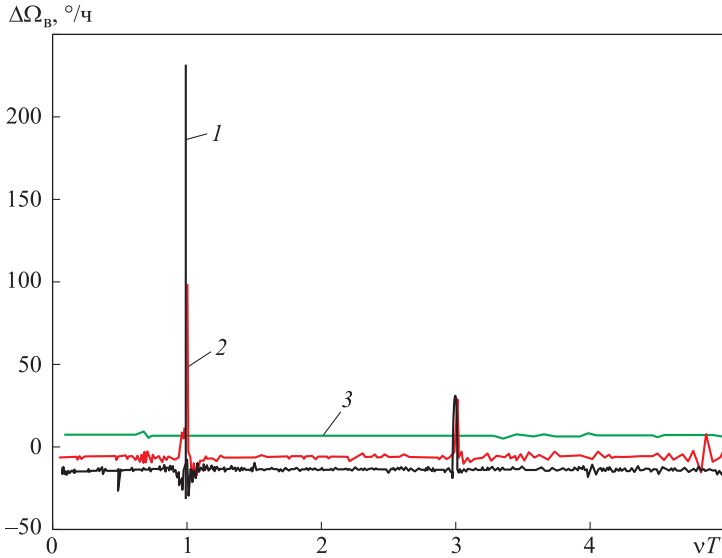


Рис. 7. Зависимость дрейфа нуля $\Delta\Omega_{в}$ от вибрации зеркал $\Delta\Omega_{з}$ от νT ЛГ с магнитооптической (земановской) подставкой при наличии статической расстройки $\Delta\lambda_0$; $f_0 = 50$ кГц; виброускорение равно 10g; $\chi = 1,5$; $\Delta\lambda_0 = 0,06$; φ_0 — неизвестна и меняется в процессе эксперимента (1, 2, 3 — см. рис. 6)

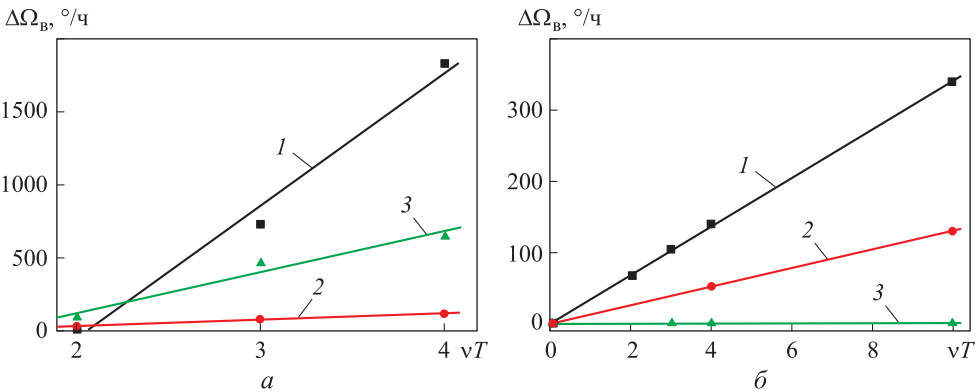


Рис. 8. Зависимости модулей максимумов дрейфов от виброускорений ЛГ с вибрационной частотной подставкой (а) и зависимости амплитудного значения вибрационного дрейфа от амплитуды воздействия виброускорения ЛГ с магнитооптической частотной подставкой на частоте коммутации частотной подставки $\nu T = 1$ (б) (1, 2, 3 — см. рис. 6)

Заключение. Вибрационная погрешность ЛГ с вибрационной подставкой полностью обусловлена угловыми колебаниями направления оси чувствительности относительно оси вибратора частотной подставки. При этом дрейф нуля существенно больше при вибрации перпендикулярной оси вибратора. Величина

дрейфа нуля на частоте вибратора достигает максимального значения, что делает прибор полностью непригодным к эксплуатации. Единственным решением является применение амортизаторов.

В отличие от ЛГ с вибрационной подставкой ЛГ с магнитооптической подставкой имеют существенно меньшую вибрационную погрешность, также проявляющуюся в основном при поперечных воздействиях и на частоте коммутации подставки. Повышение частоты коммутации подставки более верхней частоты вибрации делает такой ЛГ нечувствительным к вибрации. Лазерный гироскоп в четырехчастотном режиме принципиально не имеет вибрационного дрейфа. Также не имеет вибрационного дрейфа ЛГ без частотной подставки и ЛГ с фарадеевской подставкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов А.Г., Молчанов А.В., Чиркин М.В., Измайлов Е.А. Прецизионный лазерный гироскоп для автономной инерциальной навигации // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 1. С. 78–88.
2. Ривкин С.С., Берман З.М., Окон И.М. Определение параметров ориентации объекта бесплатформенной инерциальной системой. СПб.: ЦНИИ Электроприбор, 1996. 226 с.
3. Голяев Ю. С курса не собьется // Ведомости Русского оптического общества. 2015. № 1. С. 36–39. URL: <http://ruoptics.com/magazine/2015/s-kursa-ne-sobemsja>
4. Голяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю., Соловьева Т.И. Лазерный гирокомпас на зеемановском кольцевом лазере. Указания для самостоятельной работы по дисциплине «Системы управления, ориентации и навигации». М.: НИУ ВШЭ, 2013. 45 с.
5. Привалов В.Е. Газоразрядные лазеры в измерительных комплексах. Л.: Судостроение, 1989. 260 с.
6. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г. Кольцевые газовые лазеры с оптическим управлением в лазерной гироскопии // Квантовая электроника. 2015. Т. 30. № 2. С. 96–104.
7. Колбас Ю.Ю., Савельев И.И., Хохлов Н.И. Влияние внешних и внутренних магнитных полей на стабильность смещения нуля зеемановского лазерного гироскопа // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 6. С. 573–581.
8. ГОСТ 17053.1–80. Амортизаторы корабельные АКСС-М. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1980. 29 с.

Грушин Михаил Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» (Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1).

Колбас Юрий Юрьевич — канд. техн. наук, начальник отдела АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» (Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Грушин М.Е., Колбас Ю.Ю. Вибрационная ошибка лазерных гироскопов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 4. С. 27–42.

DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-27-42

VIBRATION ERROR OF LASER GYROS

M.E. Grushin
Yu.Yu. Kolbas

mihail.grushin1968@gmail.com
tigra-e@rambler.ru

JSC M.F. Stelmakh Research Institute Polyus, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article gives the results of theoretical and experimental studies of laser gyro's sensitivity to mechanical vibration. First, we found out that there are two mechanisms of vibrating zero drift in laser gyros — the conical movement of the sensitive axis direction and the resonator perimeter detune. Then, we analyzed the characteristic features of zero drift appearance due to vibration in gyros with magneto optical biasing and with dither biasing and identified the ways of reducing or compensating zero drift. Findings of the research show that it is possible to use optimally constructed laser gyros with magneto optical biasing without damping unlike laser gyros with dither biasing. Finally, we give the results of experimental studies of laser gyros with magneto optical biasing

Keywords

Laser gyro, zero drift, vibration, resonator perimeter detune, sensitive axis direction

REFERENCES

- [1] Kuznetsov A.G., Molchanov A.V., Chirkin M.V., Izmaylov E.A. Precise laser gyroscope for autonomous inertial navigation. *Quantum Electronics*, vol. 45, no. 1, pp. 78–88.
DOI: 10.1070/QE2015v045n01ABEH015420
Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1070/QE2015v045n01ABEH015420>
- [2] Rivkin S.S., Berman Z.M., Okon I.M. Opredelenie parametrov orientatsii ob'ekta besplatformennoy inertsiyal'noy sistemoy [Defining parameters of object orientation by strap-down inertial system]. Sankt-Petersburg, TsNIIElektropribor Publ., 1996. 226 p.
- [3] Golyaev Yu. We won't lose the direction. *Vedomosti Russkogo opticheskogo obshchestva*, 2015, no. 1, pp. 36–39 (in Russ.).
Available at: <http://ruoptics.com/magazine/2015/s-kursa-ne-sobemsja>
- [4] Golyaev Yu.D., Kolbas Yu.Yu., Solov'eva T.I. Lazernyy girokompas na zeemanovskom kol'tsevom lazere. Metod. Ukazaniya dlya samostoyatel'noy raboty po distsipline «Sistemy upravleniya, orientatsii i navigatsii» [Laser gyro-compass on Zeeman ring laser. Methodology guidelines for self-guided work on “Control, orientation and navigation systems” course]. Moscow, NIU VShE Publ., 2013. 45 p.
- [5] Privalov V.E. Gazorazryadnye lazery v izmeritel'nykh kompleksakh [Gas-discharge lasers in measuring systems]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1989. 260 p.
- [6] Azarova V.V., Golyaev Yu.D., Dmitriev V.G. Ring gas lasers with magneto-optical control for laser gyroscopy (invited paper). *Quantum Electronics*, vol. 30, no. 2, pp. 96–104.
DOI: 10.1070/QE2015v045n01ABEH015420
Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1070/QE2000v030n02ABEH001668>

[7] Kolbas Yu.Yu., Savel'ev I.I., Khokhlov N.I. Effect of external and internal magnetic fields on the bias stability in a Zeeman laser gyroscope. *Quantum Electronics*, vol. 45, no. 6, pp. 573–581. DOI: 10.1070/QE2015v045n06ABEH015538

Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1070/QE2015v045n06ABEH015538>

[8] GOST 17053.1–80. Amortizatory korabel'nye AKSS-M. Tekhnicheskie usloviya [State standard GOST 17053.1–80. Ship shock absorbers AKSS-M. Specifications]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1980. 29 p.

Grushin M.E. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Head of the Department at JSC M.F. Stelmakh Research Institute Polyus (Vvedenskogo ul. 3, Moscow, 117342 Russian Federation).

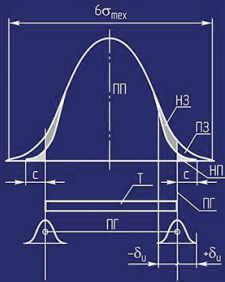
Kolbas Yu.Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Department at JSC M.F. Stelmakh Research Institute Polyus (Vvedenskogo ul. 3, Moscow, 117342 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Grushin M.E., Kolbas Yu.Yu. Vibration Error of Laser Gyros. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 4, pp. 27–42. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-27-42

Ю.А. Кокорев, Ф.Н. Звягин

Способы расчета
точностных характеристик
деталей и узлов приборов



ИЗДАТЕЛЬСТВО
ПРИBOROСТРОЕНИЯ

В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие авторов
Ю.А. Кокорева, Ф.Н. Звягина

**«Способы расчета точностных характеристик
деталей и узлов приборов»**

Изложены вопросы обоснования выбора точностных характеристик, рассмотрены возможные методы расчета на точность сложных и взаимосвязанных деталей и узлов. Приведены справочные материалы, необходимые для расчета на точность деталей и узлов приборных устройств с учетом их назначения, условий эксплуатации, требований к разработке, а также примеры расчетов приборных устройств различного назначения и рационального оформления конструкторской документации. Материалы подготовлены с учетом новых ГОСТов.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru