

АНАЛИЗ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПОГРЕШНОСТЕЙ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА МЕТОДОМ ВАРИАЦИИ АЛЛАНА

Синельников А. О.¹, Скляров Е. В.²

*(АО «Государственный научно-исследовательский
институт приборостроения», Москва,*

Российский университет дружбы народов, Москва)

Конюшко А. С.³, Тихменев Н. В.⁴, Ушанов А. А.⁵

*(АО «Государственный научно-исследовательский
институт приборостроения», Москва)*

Представлены результаты исследования шумовых характеристик и систематических погрешностей лазерного гироскопа на виброподвесе. Объектом исследования является лазерный гироскоп на виброподвесе с четырехзеркальным кольцевым резонатором периметром в 28 см и гелий-неоновой активной средой, генерирующий линейно-поляризованное излучение на длине волны 633 нм. Целью работы являлась оценка шумовых характеристик и систематических погрешностей лазерного гироскопа модели ЛГВ-1 для определения его пригодности в качестве прецизионного измерителя угловых скоростей в составе инерциальных измерительных блоков и автономных навигационных систем. Анализ шумов проведен методом вариаций Аллана по записям данных об угловой скорости, измеренной лазерным гироскопом в течение длительного времени непрерывной работы в нестабилизированных условиях окружающей среды. Определены коэффициенты доминирующих шумов выходного сигнала лазерного гироскопа: шум квантования 0,11 °, случайное блуждание угла 0,0048 °/ч^{1/2}, нестабильность смещения нуля 0,0017 °/ч. Результирующая погрешность измерения угловой скорости при времени осреднения в 100 с составила 0,0042 °/ч, что соответствует навигационному классу точности и сопоставимо с серийным гироскопом модели ЛГК-400. Выявлен ключевой источник систематической погрешности исследуемого лазерного гироскопа. Это тренд и нестабильность нулевого сигнала, связанные с работой вибро-

¹ Антон Олегович Синельников, к.т.н., доцент, начальник лаборатории (mr.sinelnikov.a@mail.ru).

² Ефим Вадимович Скляров, инженер-электроник 3 категории, магистрант (efim94s@yandex.ru).

³ Алина Сергеевна Конюшко, инженер-стажер (alina.konyushcko@yandex.ru).

⁴ Николай Вадимович Тихменев, к.ф.-м.н., начальник отдела (nik-tikhmenev@yandex.ru).

⁵ Александр Александрович Ушанов, аспирант, ведущий инженер-электроник (a.a.ushanov@mail.ru).

подвеса, вызывающей деформацию моноблока и изменение периметра резонатора кольцевого лазера. Результаты исследования демонстрируют перспективность использования лазерных гироскопов модели ЛГВ-1 в автономных инерциальных навигационных системах. Дальнейшее повышение точности и надежности исследуемого гироскопа требует оптимизации конструкции виброподвеса, а также разработки алгоритмов компенсации его влияния на стабильность периметра резонатора кольцевого лазера.

Ключевые слова: инерциальная навигационная система, лазерный гироскоп, системный анализ, вариация Аллана, шумовые характеристики.

1. Введение

Инерциальные измерительные блоки (ИИБ) служат ключевым источником первичной информации для систем навигации и управления движением летательных аппаратов (ЛА) и других динамических объектов [21, 27]. Высокая автономность ИИБ, не требующих внешних сигналов, обуславливает их критическую важность в авиационной, космической, морской и проходческой технике [3, 21, 27].

Обеспечение высокой точности определения скорости, положения и ориентации объекта в пространстве является фундаментальной задачей для современных автономных инерциальных навигационных систем (ИНС), непосредственно влияющей на качество управления ЛА в целом [9, 18]. Постоянный рост требований к качеству навигационной информации приводит к необходимости совершенствования датчиков угловой скорости и линейных ускорений – чувствительных элементов ИИБ.

Благодаря высокой точности, надежности и технологической зрелости, кольцевые лазерные гироскопы (ЛГ) являются доминирующей технологией в прецизионной инерциальной навигации. Преимущество их применения возрастает с повышением класса точности конечной системы [2, 27]. Однако практическая реализация ЛГ в составе ИИБ и автономных ИНС сталкивается с рядом системных проблем. Так, эффект захвата частот встречных волн приводит к нелинейности выходной характеристики ЛГ и зоне нечувствительности в области малых угловых скоростей [3, 6, 11, 14, 16]. Для подавления этого эф-

фекта и линеаризации характеристики применяется метод механической частотной модуляции, реализуемый посредством крутильных колебаний моноблока кольцевого лазера (КЛ) с помощью виброподвеса [3, 5, 11] (см. рис. 1а).

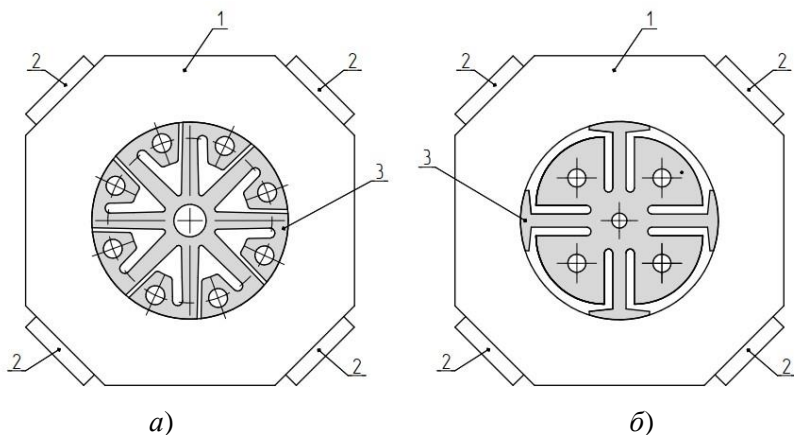


Рис. 1. Общий вид колебательной системы ЛГ:
1 – моноблок КЛ; 2 – зеркала резонатора; 3 – виброподвес
(а) ЛГК-400, б) ЛГВ-1)

Другим существенным ограничением, снижающим надежность ЛГ на виброподвесе в условиях эксплуатации, является их чувствительность к внешним воздействиям и прежде всего к механическим и температурным [20, 28].

Для решения этой проблемы в АО «ГосНИИП» был разработан виброподвес специальной конструкции (см. рис. 1б), который затем был установлен в моноблок серийного кольцевого гелий-неонового лазера с четырехзеркальным резонатором и периметром в 28 см [3]. Разработка нового виброподвеса стала основным направлением модернизации и фактически явилась разработкой нового лазерного гироскопа модели ЛГВ-1.

Схема КЛ с четырехзеркальным резонатором реализует двунаправленную генерацию лазерного излучения с линейной поляризацией на длине волны 0,6328 мкм. Это обеспечивает ЛГ стабильность смещения нуля не хуже 0,01 °/ч, необходимую для

автономной навигации [2, 22, 27]. При том любое отклонение выходной характеристики гироскопа от идеальной линейной зависимости приводит к возникновению погрешностей, влияющих на точность всей лазерной ИНС. Таким образом, внутренние шумы ЛГ, вызванные различными факторами, приводят к искажению выходного сигнала гироскопа (зависимости измеряемой угловой скорости Ω от времени t) и навигационной информации.

Для анализа и моделирования шумовых процессов в прецизионной измерительной технике широко применяется метод вариации Аллана [1, 4, 8, 19, 24]. Его ключевым преимуществом является способность идентифицировать и количественно оценивать вклад различных типов шумов (таких как белый шум угловой скорости, случайное блуждание угла, фликкер-шум и др.) в общую ошибку измерения на разных временных интервалах [13].

Эта информация необходима для понимания динамики ошибки, синтеза фильтров в системе управления навигацией и оценки точностных характеристик гироскопа в реальных условиях эксплуатации в составе ИИБ. Именно благодаря своей информативности и относительной простоте реализации, метод вариации Аллана стал стандартным инструментом анализа шумов инерциальных датчиков, включая ЛГ [4].

Целью настоящего исследования является комплексный анализ шумовых характеристик выходного сигнала $\Omega(t)$ лазерного гироскопа ЛГВ-1 с использованием методики вариации Аллана для оценки его точностных параметров и построения адекватной шумовой модели для последующего использования в синтезе систем управления и фильтрации в составе ИИБ.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Экспериментальное получение показаний и обработка выходного сигнала, исследуемого ЛГВ-1.
2. Расчет коэффициентов вариации Аллана для ряда временных интервалов интегрирования.
3. Идентификация доминирующих типов шумов и оценка их параметров на основе анализа полученных зависимостей.

4. Построение шумовой модели ЛГВ-1 на основе результатов анализа.

5. Сравнение шумовых характеристик и точностных параметров разработанного ЛГВ-1 с характеристиками серийного гироскопа навигационного класса точности типа ЛГК-400 [3].

Полученные результаты, включая параметризованную шумовую модель, предназначены для использования при проектировании алгоритмов коррекции в автономных ИНС, что особенно актуально для прецизионных приложений в авиации и космонавтике.

2. Постановка задачи

В проведенных ранее экспериментальных исследованиях вибрационных характеристик гироскопа модели ЛГК-400 с виброподвесом старой конструкции (см. рис. 1а) [11] была выявлена существенная чувствительность выходного сигнала к внешним механическим воздействиям. Для количественной оценки этой чувствительности были проведены измерения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) системы «виброподвес-моноблок КЛ».

Контроль параметров вибрационного воздействия осуществлялся с помощью датчиков виброускорения (далее «датчики»), закрепленных непосредственно на моноблоке резонатора лазера в трех ортогональных плоскостях. Данные датчики формировали сигнал, пропорциональный величине виброускорения, что обеспечило точную регистрацию амплитуды и частоты вынужденных колебаний системы при внешних механических воздействиях.

На рис. 2 представлена полученная экспериментально нормированная АЧХ гироскопа ЛГК-400 (зависимость 1), отражающая его реакцию на синусоидальное виброускорение интенсивностью 1 g в диапазоне частот $20 - 2000\text{ Гц}$. Данная АЧХ согласуется с математической моделью динамического отклика системы «виброподвес-моноблок КЛ» на внешнее возмущение [11].

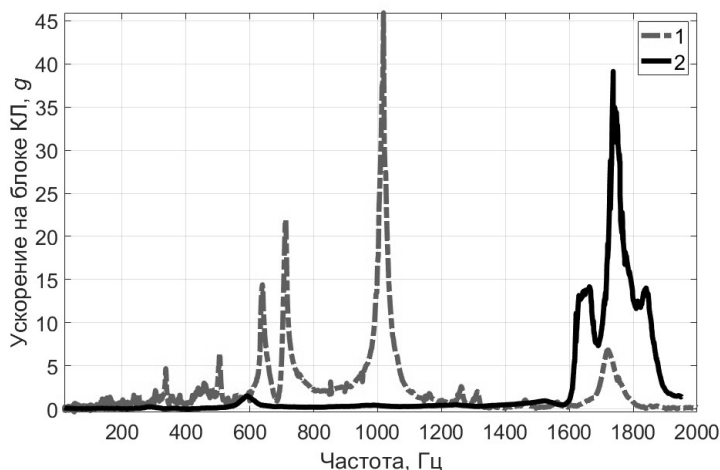


Рис. 2. Нормированные АЧХ гироскопов: 1– ЛГВ-1, 2– ЛГК-400

Анализ зависимости 1 показал наличие:

1. Основной полезной моды 0 (резонанса крутильных колебаний виброподвеса) на частоте ~ 380 Гц.
2. Нежелательных паразитных резонансных мод 1, 2 и 3 на частотах ~ 700 Гц, ~ 1000 Гц и ~ 1700 Гц, соответствующих различным типам колебаний виброподвеса.

Наличие выраженных паразитных резонансов в рабочем диапазоне частот (от 50 до 2000 Гц) свидетельствует о низкой виброустойчивости конструкции гироскопа ЛГК-400 [11].

Эти резонансы являются основным источником динамических ошибок измерения угловой скорости, так как вызывают дополнительные неконтролируемые смещения оптического контура и модуляции встречных волн, что искажает выходной сигнал ЛГ.

Таким образом, основной задачей настоящего исследования стала модернизация конструкции виброподвеса для существенного повышения виброустойчивости гироскопа в заданном диапазоне частот внешних воздействий и анализ его выходного сигнала.

Для этого была разработана новая конструкция виброподвеса для лазерного гироскопа ЛГВ-1, ключевой особенностью которой является увеличение частот паразитных резонансов с целью вывода их за верхнюю границу исследуемого диапазона воздействий в 2000 Гц. Предлагаемый положительный эффект достигается за счет оптимизации конструкции элементов подвеса.

АЧХ усовершенствованной колебательной системы ЛГВ-1 представлена на рис. 2 зависимостью 2. Сравнение с серийным гироскопом ЛГК-400 (зависимость 1 рис. 2) демонстрирует, что при сохранении полезной моды 0 на частоте ~ 300 Гц, частоты основных паразитных резонансов смещены в область около 2000 Гц и за границы исследуемого диапазона.

Ожидаемый системный эффект данного решения заключается в существенном снижении уровня динамических ошибок измерения угловой скорости гироскопом ЛГВ-1 в условиях вибрационных воздействий. Это, в свою очередь, позволяет повысить точность и надежность лазерных ИНС и ИИБ.

3. Методика оценки шумовых характеристик лазерного гироскопа методом вариации Аллана

Для анализа шумовых характеристик выходного сигнала гироскопа ЛГВ-1 использовался метод вариации Аллана [4, 8, 10]. Данный метод широко применяется в метрологии времени и является стандартным инструментом в инерциальной навигации для анализа стабильности и идентификации типов шумов в сигналах прецизионных датчиков [10, 19, 26].

Его ключевое преимущество – способность различать и количественно оценивать вклад конкретных стохастических процессов в общую ошибку измерения на разных временных масштабах.

Основная идея метода заключается в вычислении дисперсии разностей усредненных значений исследуемого сигнала для различных интервалов времени τ .

Математическая модель метода [13] для выходного сигнала ЛГВ-1 формализуется следующим образом:

$$(1) \quad \Omega_k(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k + \tau} (t) dt.$$

Имеется временной ряд $\Omega_k(\tau)$ измерений угловой скорости (или другой измеряемой величины) длиной N отсчетов, полученных с интервалом t_0 .

Для заданного времени усреднения $\tau = n \cdot t_0$ (где n – целое число отсчетов в одном интервале усреднения), исходный ряд разбивается на $K = N/n$ непересекающихся групп.

Для каждой группы вычисляется среднее значение $\Omega_i(\tau)$ ($i = 1, 2, \dots, K$) [4] и разность между последовательными усредненными значениями:

$$(2) \quad d\Omega_i(\tau) = \Omega_{i+1}(\tau) - \Omega_i(\tau).$$

Вариация Аллана $\sigma^2(\tau)$ [13] определяется как половина среднего квадрата этих разностей:

$$(3) \quad \sigma^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2n)} \sum_{i=1}^{N-2n} [\Omega_{i+1}(\tau) - \Omega_i(\tau)]^2.$$

Анализ проводится по графику зависимости $\sigma^2(\tau)$ от времени усреднения τ в логарифмических координатах, представленному на рис. 3.

Различные типы шумовых процессов в исследуемых сигналах проявляются на этом графике участками с характерными наклонами.

Этот подход позволяет проводить визуальный анализ полученных зависимостей, достаточный для инженерной оценки качества исследуемого инерциального датчика.

При этом чем выше начальная дискретность и общее время накопления исходных данных, тем точнее и больше шумовых составляющих выходного сигнала можно оценить с помощью метода вариации Аллана.

В таблице 1 представлено соответствие участков графика вариации Аллана коэффициентам, характеризующим типы шумовых процессов, источникам погрешностей ЛГ [4, 7, 23, 26].

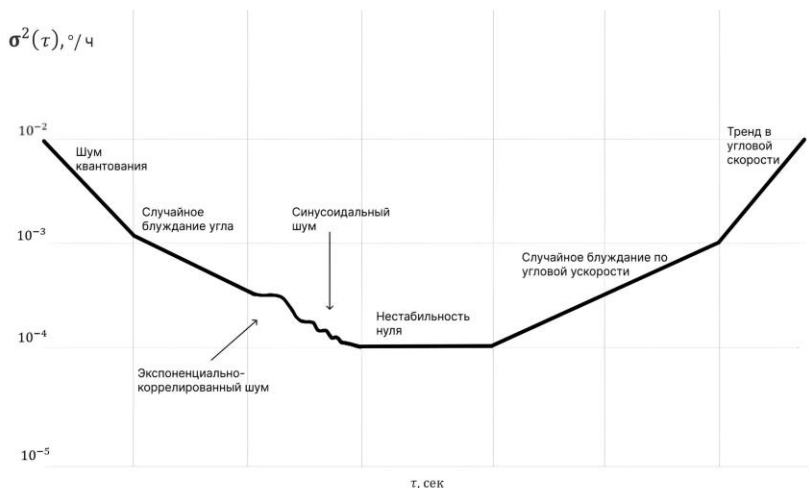


Рис. 3. Соответствие участков вариации Аллана типовым шумовым процессам в сигналах

Таблица 1. Идентификация типов шумов по наклону графика вариации Аллана

| Наклон графика $\sigma(\tau)$ | Коэффициент в разложении вариации Аллана | Тип шумового процесса/ Источник погрешности ЛГ |
|-------------------------------|--|---|
| -1 | Q | Шум квантования |
| -0,5 | N | Белый шум / Случайное блуждание угла |
| 0 | B | Фликкер-шум / Нестабильность смещения нуля |
| +0,5 | K | Случайное блуждание угловой скорости |
| +1 | R | Экспоненциально коррелированный шум/ Тренд угловой скорости |

Поскольку источники ошибок в выходном сигнале инерциальных датчиков статистически независимы[13], результирующую погрешность для вариации Аллана можно представить суммой всех шумовых составляющих зависимостью вида

$$(4) \quad \sigma^2(\tau) \approx \frac{3Q^2}{\tau^2} + \frac{N^2}{\tau} + \frac{2B^2}{\pi} \ln 2 + \frac{K^2 \tau}{3} + \frac{R^2}{2} \tau^2.$$

Для более точной количественной оценки шумовых составляющих в автоматическом режиме проводится аппроксимация нелинейным методом наименьших квадратов так, чтобы график функции (4) с полученными коэффициентами наиболее точно соответствовал графику экспериментальных данных.

В рамках настоящего исследования метод вариации Аллана был применен для анализа выходного сигнала, разработанного инерциального гироскопического датчика ЛГВ-1.

На основе экспериментальных данных зависимости $\Omega(t)$ в программной среде *MATLAB* вычислялись значения $\sigma^2(\tau)$ для широкого диапазона τ (от 1 до 10^5 с). Строился график вариации Аллана в логарифмическом масштабе.

На основе анализа наклонов различных участков этого графика (в соответствии с таблицей 1) проводилась идентификация наиболее значимых для инерциальных систем типов шумов и оценка их коэффициентов (Q , N , B).

Полученные коэффициенты использовались для построения параметрической модели шума выходного сигнала ЛГВ-1, описываемой суммой вкладов идентифицированных процессов в соответствии с выражением (4).

Анализ шумов ЛГ с помощью вариации Аллана и построение его шумовой модели имеют непосредственное значение для системного анализа и синтеза алгоритмов управления ИНС и ИИБ. Оценка точностных характеристик ЛГ через ключевые коэффициенты (Q , N , B) определяет его применимость для навигационных задач разной точности и длительности.

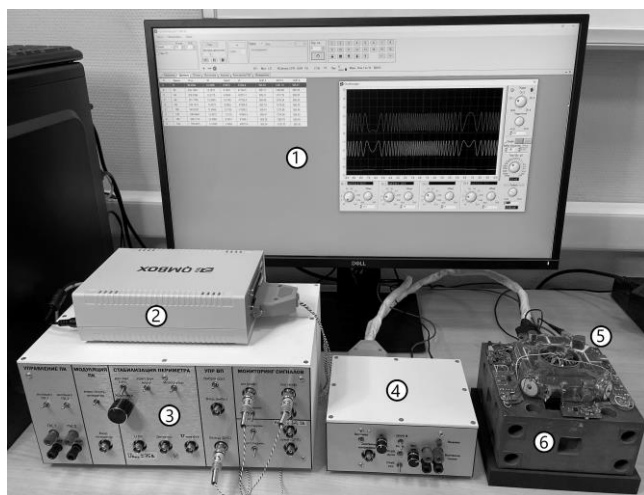
Знание спектральных характеристик шумов позволяет синтезировать оптимальные (например, Калмановские) фильтры для ИНС, минимизирующие ошибку оценки ориентации и положения объекта [10].

Данный метод предоставляет стандартизированный способ сравнения шумовых характеристик различных типов гироскопов (оптических, микромеханических, волновых твердотельных и др.), что критично для выбора инерциальных датчиков в конкретную систему управления. Выявление аномальных шумовых составляющих может указывать на дефекты в приборе или неоптимальные режимы работы, требующие коррекции.

Таким образом, метод вариации Аллана служит мощным инструментом системного анализа характеристик ЛГ (и других инерциальных датчиков) и обеспечивает необходимые данные для математического моделирования и синтеза подсистем управления (фильтрации) в рамках более крупной навигационной системы.

4. Экспериментальные исследования и основные результаты

Внешний вид экспериментальной установки с основной контрольно-измерительной аппаратурой и исследуемым ЛГ представлен на рис. 4.



*Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки:
1 – ПК с регистрируемыми параметрами, 2 – АЦП, 3 – пульт управления ЛГ, 4 – блок накачки КЛ, 5 – объект исследования, 6 – неподвижное основание*

Блок накачки 4 инициирует зажигание и стабилизирует разряд в КЛ, обеспечивая включение гироскопа 5 (ЛГВ-1, ЛГК-400), который жестко крепится через виброподвес на непо-

движное основание 6. Пульт управления контролирует режим работы ЛГ, оцифровывает выходной сигнал (разностную частоту) и передает информацию на персональный компьютер (ПК) 1 для его последующей регистрации и обработки. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 2 оцифровывает сигналы вращения ЛГ с частотой 1 МГц для проведения спектрального анализа и контроля функционирования работы.

Экспериментальные исследования включали контроль и регистрацию угловой скорости Ω (входное вращение, определяемое угловой скоростью Земли Ω_z на широте эксперимента), измеряемой гироскопами ЛГВ-1 и ЛГК-400 в нестабилизированных нормальных климатических условиях (температура окружающей среды $23 \pm 3^\circ\text{C}$ и влажность 40–50 %) в течение продолжительного времени ($t > 9$ часов).

Внешний вид зависимостей измеряемой угловой скорости от времени работы гироскопов представлен на рис. 5.

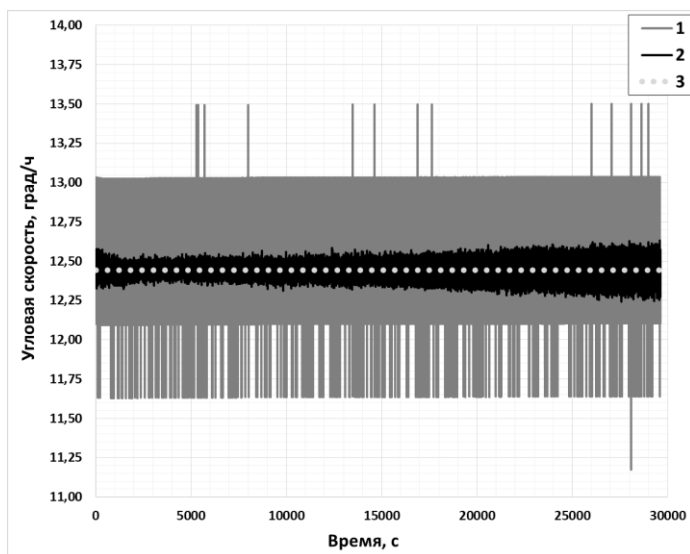


Рис. 5. Временная зависимость угловой скорости: 1 – ЛГК-400; 2 – ЛГВ-1; 3 – вращения Земли

Частота дискретизации выходного сигнала соответствовала крутильным колебаниям виброподвеса моды 0 (400 Гц для ЛГК-400 и 270 Гц для ЛГВ-1). Данные, усредненные за $t_0 = 1$ с, регистрировались незамедлительно после включения приборов без этапа предварительного прогрева и температурной компенсации выходного сигнала ЛГ в реальном времени. Согласно ранее описанной методике (см. раздел 3) в программной среде MATLAB для полученного массива данных был проведен расчет вариации Аллана $\sigma^2(\tau)$ с осреднением τ в интервале (от 1 до 10^5 с), кратным шагу дискретизации данных t_0 . Это позволило получить зависимости отклонений Аллана от интервала осреднения τ в логарифмических координатах для лазерных гироскопов ЛГК-400 и ЛГВ-1, которые представлены на рис. 6.

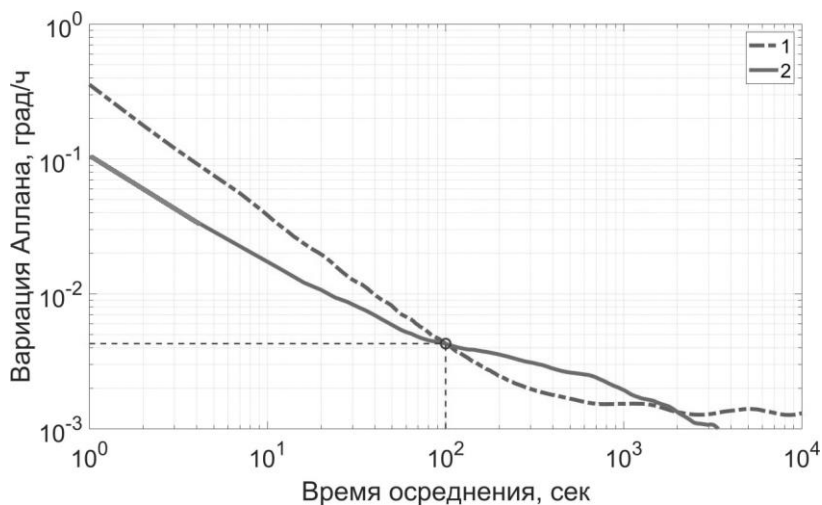


Рис. 6. Вариация Аллана для выходных сигналов ЛГ:
1 – ЛГК-400; 2 – ЛГВ-1

Графики 1 и 2 имеют характерные наклоны, соответствующие основным типам шумов инерциальных датчиков. Анализ графиков позволил выделить доминирующие шумовые составляющие и количественно оценить их уровень. Рассчитанные

согласно выражению (4) показатели шумов (Q , N , B) представлены в таблице 2.

Таблица 2. Коэффициенты шумовых составляющих в выходных сигналах ЛГ

| Тип погрешности/коэффициент, единицы измерения | ЛГК-400 | ЛГВ-1 |
|---|---------|---------|
| Шум квантования (Q), " | 0,24 | 0,11 |
| Случайное блуждание угла (N), $^{\circ}/\text{ч}^{1/2}$ | 0,00067 | 0,00048 |
| Нестабильность смещения нуля (B), $^{\circ}/\text{ч}$ | 0,00192 | 0,00164 |

5. Анализ результатов и выявление систематических факторов

Построенные зависимости вариации Аллана (рис. 6) подтверждают классическую модель шумов ЛГ.

Шум квантования является доминирующей погрешностью и имеет наибольшую амплитуду на малых интервалах усреднения τ (миллисекунды – единицы секунд). Полученное значение $Q = 0,11$ " указывает на высокую чувствительность гироскопа ЛГВ-1 к малым угловым перемещениям на коротких временных интервалах, что критично для задач точного позиционирования.

Большая дискретность оцифрованного сигнала за счет учетверения импульсов обеспечивает на порядок меньший уровень шума квантования выходного сигнала в сравнении с серийным гироскопом ЛГВ-1, что наглядно демонстрируют графики 1 и 2 (рис. 5).

Стабильность показаний ЛГ на средних временах τ (десятки секунд) определяется случайным блужданием угла N , который в свою очередь характеризует уровень белого шума. Значение $N = 0,0048$ $^{\circ}/\text{ч}^{1/2}$ свидетельствует о хорошем качестве изготовления оптических элементов КЛ и стабильности разряда в активной среде.

Однако, как видно из зависимости 2 на рис. 6, в приборе ЛГВ-1 на интервале $\tau = 100\text{--}1000$ с наблюдается наличие коррелированного шума, который отсутствует в сигнале датчика ЛГК-400. Это приводит к появлению тренда снижения средней

измеренной угловой скорости (см. график 2 на рис. 5) в течение длительного времени работы, имеющего систематическую природу вследствие несовершенства работы виброподвеса.

Согласно нашему предположению, виброподвес вызывает микродеформации ситаллового моноблока КЛ, приводящие к модуляции периметра резонатора и измеряемой разности частот встречных волн (эффект Саньяка), создавая кажущийся дрейф сигнала. Нестабилизированные условия испытаний усугубляют этот эффект.

Изменения температуры лаборатории вызывают дополнительные термические деформации моноблока, также влияя на периметр КЛ и внося вклад в наблюдаемый тренд. Совпадение средней скорости, измеряемой гироскопами ЛГК-400 и ЛГВ-1 подтверждает, что именно конструкция виброподвеса является основным источником данного систематического смещения нуля в условиях проведенного эксперимента.

Нулевой порог на графике вариации Аллана соответствует нестабильности смещения нуля выходного сигнала и определяет предельную точность ЛГ. Его значение $B \sim 0,0017 \text{ } ^\circ/\text{ч}$ является ключевым показателем для навигационных применений.

При 100-секундном осреднении погрешность измерения угловой скорости составила $0,0042 \text{ } ^\circ/\text{ч}$ для обоих типов ЛГ. Данное значение подтверждает, что гироскоп ЛГВ-1 соответствует требованиям навигационного класса точности (обычно $< 0,01 \text{ } ^\circ/\text{ч}$).

Это демонстрирует правильность выбора конструкции КЛ и эффективности разработанного виброподвеса для достижения высокой стабильности показаний ЛГВ-1 в условиях внешних воздействий.

6. Заключение

В ходе проведенного исследования методом вариации Аллана были количественно оценены шумовые характеристики выходного сигнала кольцевого лазерного гироскопа типа ЛГВ-1, разработанного в АО «ГосНИИП».

Показано, что гироскоп ЛГВ-1 по своим точностным параметрам (прежде всего, по нестабильности смещения нуля) полностью соответствует навигационному классу точности и сопоставим с серийным прибором модели ЛГК-400, применяемым в автономных ИНС и ИИБ.

Анализ графика вариации Аллана подтвердил классические шумовые модели, присущие инерциальным датчикам, и выявил ключевой источник систематической погрешности гироскопа ЛГВ-1: влияние виброподвеса. Помимо эффективной линеаризации выходной характеристики ЛГ, его работа вызывает микрореформации ситаллового моноблока КЛ, изменяя периметр резонатора и создавая наблюдаемый тренд снижения и нестабильность выходного сигнала.

Полученные точностные характеристики (низкий дрейф, высокое разрешение и стабильность нулевого сигнала) подтверждают высокий потенциал разработанного лазерного гироскопа ЛГВ-1 для задач прецизионного приборостроения и аэрокосмической отрасли.

Литература

1. АБАТУРОВ М.А., АНДРЕЕВ В.Н. *Возможности применения метода вариации Аллана при анализе квазистационарного микросейсмического шума* // Естественные и технические науки. – 2024. – №11(198). – С. 169–172. – DOI: 10.25633/ETN.2024.11.12. – EDN ZWPYBL.
2. АНДРЕЕВ В.Г., ЖИРКОВ Е.А. *Анализ сигналов лазерных гироскопов для автопилотирования маневрирующих объектов* // Цифровая обработка сигналов. – 2024. – №4. – С. 28–32. – EDN CSPGCR.
3. АФАНАСЬЕВ В.Б., МЕДВЕДЕВ В.М., СИНЕЛЬНИКОВ А.О. и др. *Исследование параметров кольцевого лазера при воздействии внешних возмущений* // Радионавигация и время: труды СЗРЦ Концерна ВКО «Алмаз – Антей». – 2025. – №16(24). – С. 33–48. – EDN LIMUUB.

4. БОЛОТНОВ А.С., ФОМИН И.И. *Исследование лазерного гироскопа с использованием метода вариации Аллана* // Политехнический молодежный журнал. – 2021. – №05(58).
5. ЕНИН В.Н., САНЕЕВ И.В., ВОЛКОВ Э.В. *Малогабаритный прецизионный лазерный гироскоп с виброподставкой* // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2017. – №5. – С. 105–118. DOI: 10.7463/0517.0001153. – EDN: ZTIVCSJ
6. ИВАНЕНКО Ю.Р., МИШИН В.Ю., МОЛЧАНОВ А.В. и др. *Компенсация динамического захвата в кольцевом лазерном гироскопе* // Навигация и управление летательными аппаратами. – 2022. – №3(38). – С. 12–27.
7. ЛИТВИН М.А., МАЛЮГИНА А.А., МИЛЛЕР А.Б. и др. *Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации* // Информационные процессы. – 2014. – Т. 14, №4. – С. 326–333.
8. МИХЕЕВ А.В., АНЧУТИН С.А., КОЧУРИНА Е.С. и др. *Применение вариации Аллана для оценки случайных погрешностей датчиков угловой скорости* // Нано- и микросистемная техника. – 2021. – Т. 23, №3. – С. 153–157. – DOI 10.17587/nmst.23.153-157. – EDN TYTBNI.
9. НАУМЧЕНКО В.П., ИЛЮШИН П.А., ПИКУНОВ Д.Г. и др. *Оптимизационный подход к начальной выставке платформенной инерциальной системы при воздействии шумов* // Вестник Московского авиационного института. – 2023. – Т. 30, № 2. – С. 158–168. – DOI: 10.34759/vst-2023-2-158-168. – EDN VCHRWM.
10. СТЕПАНОВ О.А., ЧЕЛПАНОВ И.Б., МОТОРИН А.В. *Точность оценивания постоянной составляющей погрешности датчиков и ее связь с вариацией Аллана* // Гироскопия и навигация. – 2016. – Т. 24, №3(94). – С. 63–74. – DOI: 10.17285/0869-7035.2016.24.3.063-074. – EDN WTPSLJ.
11. ТИХМЕНЕВ Н.В., СИНЕЛЬНИКОВ А.О., УШАНОВ А.А. и др. *Исследование функционирования кольцевого лазерного гироскопа при вибрационных воздействиях* // Управление большими системами: сборник трудов. –

2024. – №109. – С. 293–309. – DOI: 10.25728/ubs.2024.109.13. – EDN AZYYPE.
12. ЧИРКИН М.В., ИВАНЕНКО Ю.Р., СЕРЕБРЯКОВ А.Е. и др. *Чувствительность метода цифровой обработки первичных сигналов лазерного гироскопа к возмущениям входной информации* // Управление большими системами. – 2024. – Вып. 109. – С. 243–267. – DOI: 10.25728/ubs.2024.109.11. – EDN EZYMHT.
 13. ALLAN D.W. *Historicity, strengths, and weaknesses of Allan variances and their general applications* // Gyroscopy and Navigation. – 2016. – Vol. 7, No. 1. – P. 1–17. – DOI: 10.1134/S2075108716010028
 14. BOLOTNOV S.A., NAZAROV S.I., SINEL'NIKOV A.O. et al. *Analysis of Laser Gyro Errors during Path Length Active Stabilization* // Gyroscopy and Navigation. – 2024. – Vol. 15, No. 3. – P. 215–225. – DOI: 10.1134/S2075108724700317. – EDN JBCLRQ.
 15. CHARU PRIYA S., DEEPA T. *Design and Analysis of Allan Variance Based Adaptive Noise Canceller for Vehicular Visible Light Communication* // Optical and Quantum Electronics. – 2024. – Vol. 56. – P.792. – DOI: 10.1007/s11082-024-06679-y.
 16. CHIRKIN M.V., USTINOV S.V., MISHIN V.YU. et al. *On the Stability of a Bilateral Discharge in a Ring Laser* // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2023. – Vol. 17, No. 3. – P. 612–619. – DOI: 10.1134/s1027451023030047. – EDN EVSYZR.
 17. CHOPRA K.N. *Ring Laser Gyroscopes* // Optoelectronic Gyroscopes. Progress in Optical Science and Photonics. – 2021. – Vol. 11.
 18. GOLOVAN A.A., VISHIN V.Y., CHIRKIN M.V. et al. *Method for Analyzing the Influence of the Errors Induced by the Gyroscopic Channel of a Strapdown INS in the Autonomous Mode* // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2021. – Vol. 60, No. 4. – P. 627–638. – DOI: 10.1134/S1064230721040043. – EDN MCOYSW.

19. ICHIMURA T., KAWAGUCHI T., YANO Y. et al. *Higher-Order Allan Variance for Frequency Stability Evaluation of Multi-Dimensional Atomic Clocks* // IEEJ Trans. on Electronics, Information and Systems. – 2023. – No. 143(10). – P. 1017–1024.
20. KLIMKOVICH B.V. *Effect of Random Error of Temperature Sensors on the Quality of Temperature Compensation of FOG Bias by a Neural Network* // Gyroscopy and Navigation. – 2021. – Vol. 12, No. 1. – P. 27–37. – DOI: 10.1134/S2075108721010089. – EDN MHPMHD.
21. KOROLEV O.E. *Correction of a Strapdown Inertial Navigation System During Descent in the Atmosphere* // Mechanics of Solids. – 2023. – Vol. 58, No. 1. – P. 56–62. – DOI: 10.3103/s0025654422600830. – EDN WMPPLE.
22. MOLCHANOV A.V., SEREBRYAKOV A.E., KLIMAKOV V.V. et al. *The effect of slow fluctuation processes in the ring laser gyroscope on its bias instability* // Proc. of the 25th Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems (ICINS–2018), Saint Petersburg, 28–30 may 2018. – Saint Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. – P. 1–4. – DOI: 10.23919/ICINS.2018.8405898. – EDN YBYLNZ.
23. PEI H., FAN W., DU P. et al. *Markov Noise in Atomic Spin Gyroscopes: Analysis and Suppression Based on Allan Deviation* // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2023. – Vol. 72. – P. 1–12. – DOI: 10.1109/TIM.2023.3246473.
24. RI Y.G., SIN C.M., KANG J.G. *Statistical Modelling of Rate Gyros Based on Fully Overlapping Allan Variance* // IET Science, Measurement & Technology. – 2022. – Vol. 16, No. 1. – P. 69–77. – DOI: 10.1049/sm22.12080.
25. RUDYK A.V., SEMENOV A.O., KRYVINSKA N. et al. *Strapdown Inertial Navigation Systems for Positioning Mobile Robots–MEMS Gyroscopes Random Errors Analysis Using Allan Variance Method* // Sensors. – 2020. – Vol. 20, No. 17. – P. 4841. – DOI: 10.3390/s20174841.
26. SIRAYA T.N., *Statistical interpretation of the Allan variance as a characteristic of measuring and navigation devices* // Gy-

- roscopy and Navigation. – 2020. – Vol. 11, No. 2. – P. 105–114. – DOI: 10.1134/S2075108720020078. – EDN BZRPZR.
27. SINELNIKOV A.O., TIKHMENEV N.V., USHANOV A.A. et al. *State-of-the-Art and Development Trends of Inertial Navigation Systems Based on the Ring Laser Gyroscopes* // *Photonics Russia*. – 2024. – Vol. 18, No. 6. – P. 450–466.
28. SINELNIKOV A.O., MEDVEDEV A.A., GOLYAEV Y.D. et al. *Thermal Zero Drifts in Magneto-Optical Zeeman Laser Gyroscopes* // *Gyroscopy and Navigation*. – 2021. – Vol. 12, No. 4. – P. 308–313. – DOI: 10.1134/S2075108721040076. – EDN PPTEAX.

ANALYSIS OF NOISE CHARACTERISTICS AND ERRORS IN THE LASER GYROSCOPE USING ALLAN VARIANCE

Anton Sinelnikov, JSC «State Research Institute of Instrument Engineering», Moscow, RUDN University, Moscow, Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor (mr.sinelnikov.a@mail.ru).

Efim Sklyarov, JSC «State Research Institute of Instrument Engineering», Moscow, RUDN University Moscow, Master Student (efim94s@yandex.ru)

Alina Konyushko, JSC «State Research Institute of Instrument Engineering», Moscow (alina.konyushcko@yandex.ru)

Nikolay Tikhmenev, JSC «State Research Institute of Instrument Engineering», Moscow, Ph.D. of Physics and Mathematics Sciences, Head of Development Department (nik-tikhmenev@yandex.ru).

Aleksandr Ushanov, JSC «State Research Institute of Instrument Engineering», Moscow, Postgraduate Student (a.a.ushanov@mail.ru).

Abstract: In the article presented results of research of noise characteristics and systematic errors of the diher laser gyroscope. The object of research is a diher laser gyroscope with a four-mirror ring resonator perimeter of 28 cm and a helium-neon active medium, generating linearly polarized radiation at a wavelength of 633 nm. The purpose of the work was assessment of noise characteristics and systematic errors of the laser gyroscope model LGV-1 for determining its suitability as a precision measurer of angular velocities as part of inertial measurement units and autonomous navigation systems. Analysis of noises conducted by the method of Allan variations according to records of data on angular velocity, measured by the laser gyroscope during long time of continuous operation in unstabilized environmental conditions. Determined

coefficients of dominant noises of the output signal of the laser gyroscope: quantization noise 0,11 ", angle random walk 0,0048 °/h^{1/2}, zero-bias instability 0,0017 °/h. The resulting error of angular velocity measurement at averaging time of 100 s amounted to 0,0042 °/h, which corresponds to the navigation class of accuracy and is comparable with the serial gyroscope model LGK-400. Revealed the key source of systematic error of the studied laser gyroscope. This is trend and instability of the zero signal, related to the operation of the dither, causing deformation of the monoblock and changing the perimeter of the ring laser resonator. The results of the research demonstrate the prospects of using laser gyroscopes model LGV-1 in autonomous inertial navigation systems. Further improvement of accuracy and reliability of the studied gyroscope requires optimization of the dither design, as well as development of compensation algorithms for its influence on the stability of the perimeter of the ring laser resonator.

Keywords: inertial navigation system, laser gyroscope, system analysis, Allan variation, noise characteristics.

УДК 303.732.3

ББК 32.86-53

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии А.И. Алчиновым.*

Поступила в редакцию 30.06.2025.

Опубликована 30.11.2025.