

А. Е. ФЕДОРОВ, В. А. ЧИРКОВ, Д. А. РЕКУНОВ, Н. В. УСПЕХОВ, Э. В. ТРУШКОВСКИЙ

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ГИРОСКОП М-40

Малогабаритный трехкомпонентный лазерный гироскоп М-40 разработан ОАО «Раменский приборостроительный завод» для применения в навигационных системах и системах ориентации среднего класса точности, предъявляющих повышенные требования к массогабаритным характеристикам, устойчивости прибора к внешним механическим воздействиям и времени функциональной готовности. Рассматриваемый гироскоп является автономным измерителем параметров ориентации с выдачей информации в цифровом виде.

Введение

Кольцевой лазерный гироскоп является одним из широко применяемых типов гироскопических чувствительных элементов для бесплатформенных инерциальных систем различного назначения. Как показывает анализ современных тенденций развития гироскопических систем [1], определенные области применения лазерных гироскопов высокой и средней точности могут быть заняты волоконно-оптическими и твердотельными волновыми гироскопами. Однако благодаря достигнутому соотношению точности и устойчивости к внешним воздействиям, отработанной технологии изготовления лазерные гироскопы будут продолжать успешно конкурировать с другими типами гироскопов в диапазоне точностей $0,05 - 0,003^\circ/\text{ч}$, и продолжение опытно-конструкторских работ в этой области актуально для российских предприятий.

Идея шестизеркального трехкомпонентного лазерного гироскопа (ТЛГ) с четырехугольными контурами была высказана в 60-х годах, реализована впервые компанией Kearfott (США), затем компанией SEXTANT Avionique (в настоящее время Thales, Франция) [2]. Начиная с 90-х годов эти фирмы производят и постоянно наращивают объемы выпуска ТЛГ такого типа с периметрами 16 и 24 см (Kearfott) и 14 и 22 см (Thales). К основным преимуществам такой схемы относятся максимальная компактность и минимальная стоимость. Также к преимуществам следует отнести жесткость и ортогональность трехгранника осей чувствительности, наличие единой для трех осей вибрационной подставки, причем погрешность списания подставки присутствует только в вертикальной (курсовой) оси чувствительности. Недостатком можно считать более сложную технологию и оснастку при сборке и юстировке оптической системы, однако

Федоров Андрей Евгеньевич. Заместитель главного инженера ОАО «Раменский приборостроительный завод» (ОАО «РПЗ») (Московская обл., г. Раменское).

Чирков Владимир Антонович. Директор-главный конструктор НПП «Оптика-М» (г. Раменское).

Рекунов Дмитрий Андреевич. Начальник бюро ОАО «РПЗ».

Успехов Николай Викторович. Инженер ОАО «РПЗ».

Трушковский Эдвард Викентьевич. Ведущий инженер-конструктор НПП «Оптика-М».

Статья по докладу на XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

существенным он является только на этапе серийного производства.

В СССР разработка ТЛГ началась в первой половине 70-х годов и проводилась в Научно-исследовательском институте прикладной физики (НИИПФ, Москва) под руководством члена-корреспондента АН СССР Л.Н.Курбатова. Была отработана технология изготовления трех кольцевых лазеров в едином ситалловом блоке. В конце 70-х годов в НИИПФ под руководством В.А.Зборовского был разработан ТЛГ «Шпинель» и совместно с ОКБ «Темп» (в настоящее время ОАО «Темп-Авиа», г. Арзамас) была изготовлена и прошла стендовые испытания лазерная бесплатформенная инерциальная навигационная система на его базе.

Дальнейшей разработкой в области моноблочных ТЛГ с вибрационной подставкой стало изделие «Морион» для применения в качестве гироскопического чувствительного элемента (ЧЭ) системы управления и стабилизации телескопа на борту орбитальной станции «Салют-6». Чувствительный элемент «Морион» представлял собой двенадцатизеркальный ТЛГ с периметрами контуров 28 см.

В конце 90-х – начале 2000-х годов на ОАО «Раменский приборостроительный завод» конструкция чувствительного элемента типа «Морион» была доведена до серийного выпуска.

В результате отработки технологии на ОАО «Раменский приборостроительный завод» появилась возможность разработать и изготовить опытные образцы малогабаритного шестизеркального ТЛГ с периметрами 16 см, масса которого составляет 225 грамм, объем – 175,6 см³.

Конструкция трехкомпонентного лазерного гироскопа

Структурно-функциональная схема ТЛГ М-40 показана на рис. 1.

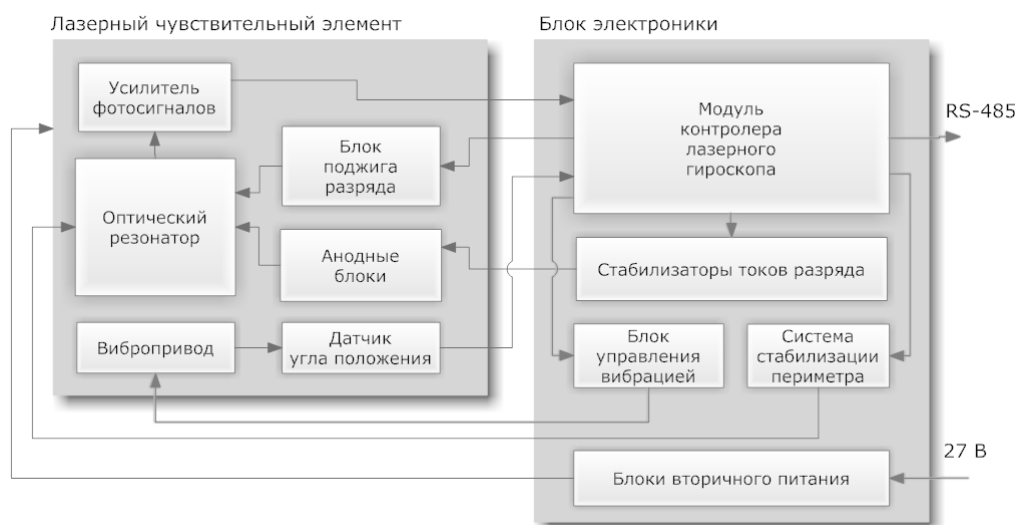


Рис. 1. Структурно-функциональная схема ТЛГ М-40

ТЛГ М-40 состоит из лазерного чувствительного элемента (ЛЧЭ) и блока электроники. ЛЧЭ М-40 содержит оптический резонатор, представляющий собой три кольцевых лазера (КЛ) в ситалловом моноблоке; блоки поджига разряда для начального запуска КЛ; привод знакопеременной виброподставки для устранения зоны нечувствительности; датчик углового положения для вычета виб-

рационального движения из выходного сигнала и реализации обратной связи в системе управления виброприводом; анодные блоки, обеспечивающие заданные режимы разряда. В сборку ЛЧЭ М-40 включается усилитель сигналов фотоприемников, что обеспечивает минимизацию длины проводных соединений от фотоприемников до усилителя.

Блок электроники (БЭ) обеспечивает выдачу управляющих напряжений для ЛЧЭ, съем и обработку аналоговых сигналов, расчет приращений углов поворота с компенсацией инструментальных погрешностей, реализацию алгоритмов контроля и формирования выходных данных. БЭ содержит модуль контролера ЛГ, включающий цифровые схемы обработки первичной информации и формирования управляющих воздействий, вычислитель, аналоговые схемы управления и блоки вторичного питания.

В отличие от серийно выпускаемого трехкомпонентного лазерного гироскопа [3] с периметром резонатора 28 см, ТЛГ М-40 имеет ряд конструктивных и технологических особенностей, позволяющих значительно уменьшить массу и габариты при улучшении эксплуатационных характеристик.

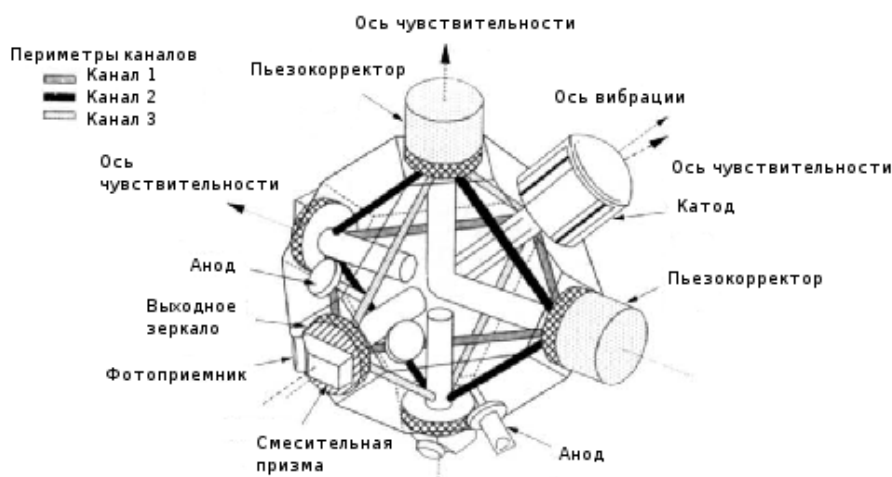


Рис. 2. Схема компоновки оптического резонатора

Оптический резонатор ТЛГ М-40 построен по шестизеркальной схеме с общей для всех каналов газовой средой и холодным катодом. Схема компоновки оптического резонатора (рис. 2) взята из монографии [4] и является общепринятой для ТЛГ такого типа. Каждое зеркало является общим для двух смежных каналов. При сборке генератора используется пайка свинцом в вакууме, зеркала устанавливаются на оптический контакт. Это позволяет расширить допустимый диапазон температурных воздействий и проводить более глубокую вакуумную очистку резонатора. Герметичность прибора обеспечивается на уровне 10^{-12} л·мм рт. ст/с.

Для создания оптимального эмиссионного слоя оксидной пленки на поверхности катода производится дополнительное окисление катода из бериллия в катодном режиме в кислородной плазме. Использование катода из бериллия и глубокая вакуумная очистка резонатора обеспечивают ресурс кольцевого лазера не менее 20 тыс. ч, а при оптимизации рабочих токов разряда срок службы может составить до 100 тыс. ч.

В виброприводе ЧЭ используются пьезокерамические элементы, один из которых является датчиком угла поворота. Вибрация осуществляется на резонансной частоте 330 Гц в автоколебательном режиме с амплитудой до 5 угл. мин.

Электрические и оптические характеристики ЛЧЭ опытных образцов ТЛГ М-40

Для контроля параметров при юстировке используется автоматизированное рабочее место (АРМ), в состав которого входит зондирующий линейный гелий-неоновый лазер, электрооптический модулятор, поворотные зеркала, столик с узлом крепления для поворота и перемещения измеряемого резонатора, фотоприемное устройство, источник света и окуляр для наблюдения диафрагмы сферического зеркала, регулируемые кронштейны, интерфейсная электроника сопряжения с ПЭВМ.

С помощью программно-математического обеспечения АРМ рассчитываются потери на модах TEM_{00q} , TEM_{01q} , TEM_{10q} , обусловленные тремя факторами: интегральным рассеиванием, пропусканием и поглощением. Фазовая анизотропия – дополнительная к π разность скачков фаз p и s компонент отраженного света также рассчитывается с помощью АРМ.

Для проведения вакуумно-термической обработки (ВТО) используются откачные посты с двухступенчатой системой откачки. После всех технологических обработок по ВТО прибор заполняют рабочей смесью изотопов неона и гелия. Подтверждено, что как потери резонатора, так и фазовая анизотропия не меняются ни после проведения ВТО, ни в процессе длительной приработки резонатора, что свидетельствует о стойкости оптического покрытия зеркал.

В табл. 1 приведены потери резонаторов до и после ВТО.

Таблица 1

Потери резонаторов М-40 до и после вакуумно-температурной обработки

Потери на модах до ВТО, %			
Резонаторы	Мода TEM_{00q}	Мода TEM_{01q}	Мода TEM_{10q}
1	0,086	0,139	0,138
2	0,086	0,133	0,126
3	0,087	0,132	0,125
Потери на модах после ВТО, %			
Резонаторы	Мода TEM_{00q}	Мода TEM_{01q}	Мода TEM_{10q}
1	0,085	0,137	0,136
2	0,080	0,120	0,120
3	0,081	0,113	0,109

Для каждого резонатора были сняты следующие характеристики: мощностные для каждого из трех каналов и вольт-амперные (ВАХ) каждого плеча для каждого канала.

На рис. 3 показаны зависимости напряжений на выходе усилителя фотоприемника U_f , пропорционального мощности излучения кольцевого лазера ($U_f = R \cdot I_f$, где I_f – ток фотодиода, $R = 1 \cdot 10^6$ Ом), от тока разряда I_r .

Для определения ВАХ резонатора использовался цифровой вольтметр. Напряжения измерялись с помощью делителя на плече сопротивлением 1 МОм и пересчитывались с помощью коэффициента для определения величины напряжения в разряде.

На рис. 4 показана ВАХ для трех каналов при давлении рабочей смеси 6 мм рт. ст.

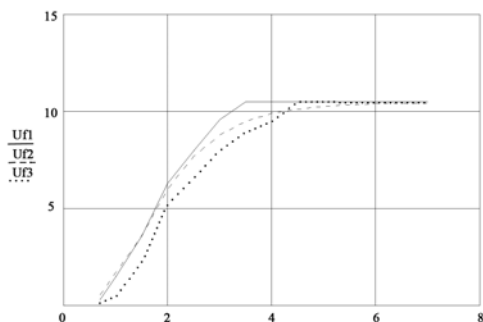


Рис. 3. Зависимость напряжения на УФП от тока разряда при давлении 6 мм рт. ст.

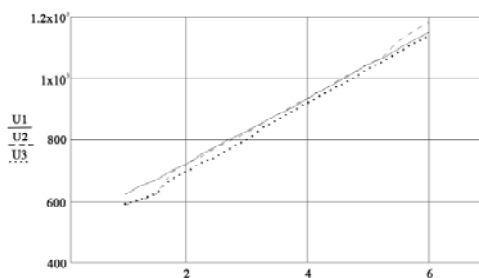


Рис. 4. ВАХ генератора при давлении 6 мм рт. ст.

Проверка точностных характеристик трехкомпонентного лазерного гироскопа

Для оценки точностных характеристик ТЛГ М-40 использовалась технологическая контрольно-проверочная аппаратура (ТКПА) с пультом контроля и управления.

Структурно-функциональная схема ТКПА показана на рис. 5.



Рис. 5. Структурно-функциональная схема ТКПА М-40

Пульт контроля и управления построен на базе промышленного компьютера в формате *microPC*. Для формирования управляющих воздействий и измерения аналоговых параметров использовались платы ЦАП и АЦП. В модуле центрального процессора (ЦП) реализованы алгоритмы управления, накопления и обработки полученных данных, а также формирования протоколов испытаний.

Методика проверки точностных параметров, ранее отработанная на ТЛГ типа «Морион» [5], основана на оценке дрейфа угловой скорости при измерении постоянного вращения Земли. Запись дрейфа происходит путем интегрирования кинематического уравнения Пуассона на частоте съема, в 12–16 раз превышающей частоту вибрационной подставки, в течение заданного интервала времени, обычно выбираемого в пределах от 1 до 10 мин. При этом с шагом 0,3–3 с значение накопленного вектора сохраняется в массиве данных, а в постобработке полученная запись дифференцируется и преобразуется в запись компонент угловой скорости. Такая процедура позволяет исключить кинематические погрешности, связанные с вибрационной подставкой и с более низкочастотными колебаниями, в том числе и при наличии амортизирующих узлов крепления.

Для оценки воспроизводимости систематической составляющей дрейфа угловой скорости от запуска к запуску была проведена серия запусков в нормальных условиях при закреплении ТЛГ на массивном основании.

Запуски длительностью 3 ч проводились из холодного состояния по одному запуску в день. Средние значения компонент угловой скорости вращения Земли за запуск приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Измеренные значения проекций угловой скорости (Ω_1 , Ω_2 , Ω_3)

Запуск	Ω_1 , град/ч	Ω_2 , град/ч	Ω_3 , град/ч
1	8,129	13,356	1,240
2	8,120	13,354	1,253
3	8,137	13,353	1,265
4	8,124	13,353	1,244

Вариация среднего значения угловой скорости от запуска к запуску не превышает 0,025°/ч для худшего канала и менее 0,005°/ч для лучшего. Для определения влияния самопрогрева на изменение систематической и случайной составляющих скорости дрейфа в запуске были проведены две серии запусков из холодного состояния.

Последующие запуски проводились без выключения гироскопа, но с возможностью задания различных уровней напряжения на каждом пьезокорректоре в отдельности. Гироскоп в этих запусках был закреплен на кронштейне для температурных испытаний.

На рис. 6 сравниваются графики компонент угловой скорости и напряжений на пьезокорректорах в двух последовательных запусках в каждой из этих серий. Первый запуск в серии проводился из холодного состояния, а второй – непосредственно после первого.

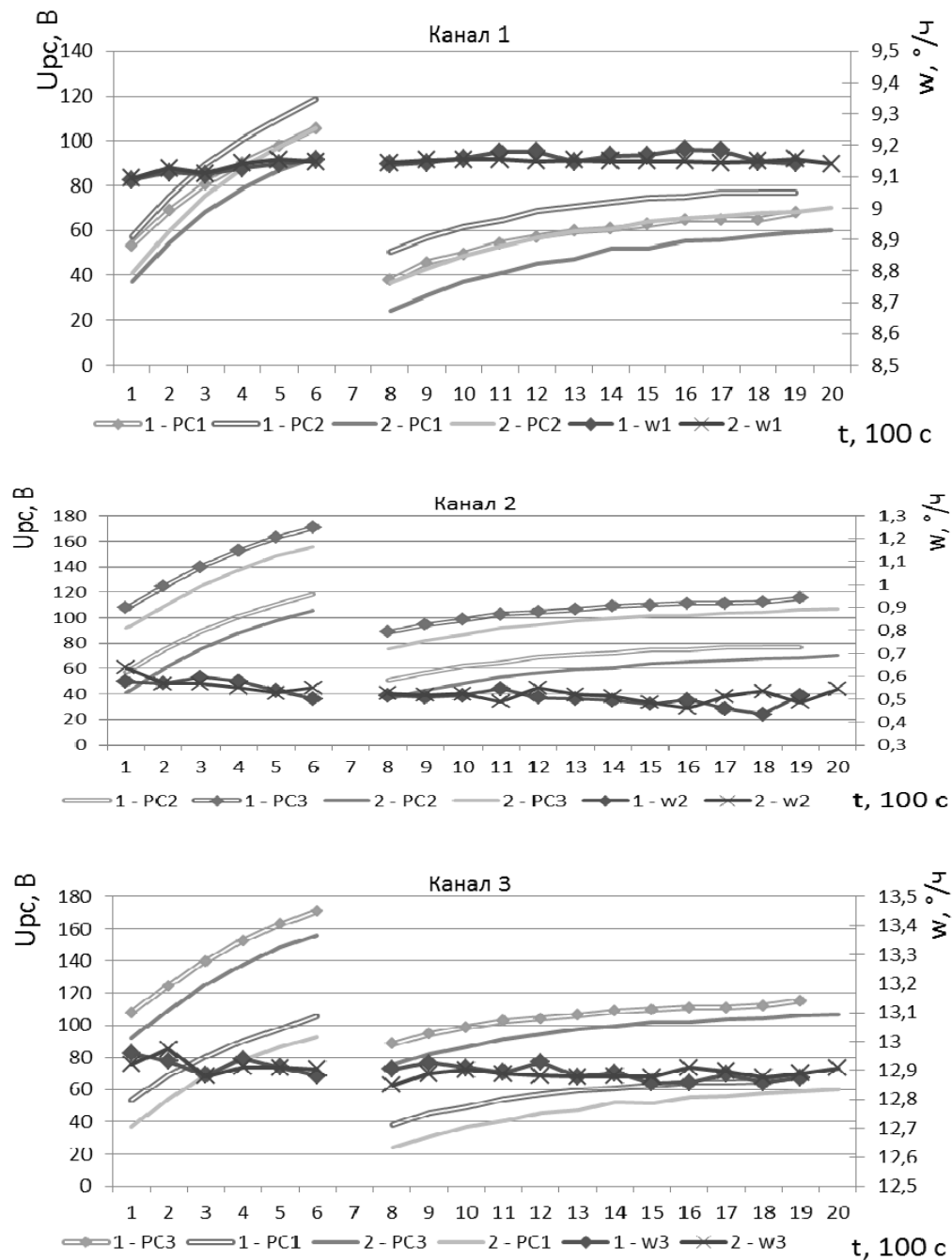


Рис. 6. Запись компонент угловой скорости (w) (обозначение $n-wx$) и напряжений на пьезокорректорах (U_{pc}) (обозначение $n-PCx$) в двух сериях запусков:
 n – номер серии, x – номер канала

На запусках из холодного состояния виден воспроизводимый с высокой точностью «выбег дрейфа». Величина этого «выбега» за первые 10 мин составляет 0,05-0,07 град/ч и требует для своей компенсации специальной модели, отличающейся от модели температурной зависимости систематической составляющей дрейфа.

Для оценки зависимости установившейся в запуске систематической составляющей дрейфа от температуры окружающей среды были выполнены запуски в термокамере при температурах, приведенных в табл. 3.

Таблица 3

**Измеренные значения проекций угловой скорости (Ω_1 , Ω_2 , Ω_3)
при различных температурах**

T, °C	Ω_1 , град/ч	Ω_2 , град/ч	Ω_3 , град/ч
- 40	9,369 / 9,403	0,290 / 0,297	13,114 / 13,172
- 20	9,223 / 9,227	0,553 / 0,557	12,986 / 13,027
- 10	9,124 / 9,146	0,567 / 0,584	12,911 / 12,964
+ 20	9,024 / 9,069	0,566 / 0,610	12,854 / 12,910
+ 40	8,959 / 8,990	0,592 / 0,603	12,902 / 12,914
+ 60	9,131 / 9,172	0,456 / 0,490	12,921 / 12,950

Через косую черту указаны минимальное и максимальное значения измеренной компоненты угловой скорости в запусках при изменении периметров резонаторов в установившемся тепловом режиме. Из данных таблицы следует, что в диапазоне температур от минус 20 до плюс 60°С температурная вариация систематической составляющей дрейфа не превышает 0,1-0,2 град/ч и видна тенденция к увеличению температурной зависимости при уменьшении температуры ниже минус 20°С.

Была проведена оценка зависимости систематической составляющей дрейфа от изменения периметра резонатора. Конструкция пьезокорректора допускает изменение периметров резонаторов на ± 2 длины волны (λ) относительно центрального максимума диаграммы Доплера. Проверка проводилась при закреплении гироскопа на массивном основании в нормальных условиях после выхода в стационарный тепловой режим. Результаты приведены в табл. 4.

Интересно отметить, что во втором канале видно изменение величины систематической составляющей дрейфа примерно на 0,05°/ч при перестройке периметра резонатора через λ , в то время как в первом измерительном канале такое изменение отсутствует, а в третьем составляет 0,01°/ч.

Таблица 4

**Измеренные значения проекций угловой скорости (Ω_1 , Ω_2 , Ω_3)
при различных значениях периметра резонатора**

Запуск	$U_{\text{пк1}}$	$U_{\text{пк2}}$	$U_{\text{пк3}}$	Ω_1 , °/ч	Ω_2 , °/ч	Ω_3 , °/ч
1	56	54	23	7,897	13,393	1,183
2	96	94	74	7,894	13,357	1,174
3	128	126	113	7,903	13,379	1,165
4	158	160	152	7,899	13,355	1,154
5	206	202	202	7,888	13,400	1,130

Оценка шумовой составляющей дрейфа ТЛГ М-40 приведена на рис. 7 в виде диаграмм типа вариации Аллана в осях чувствительности оптического резонатора ТЛГ (W_1 , W_2 , W_3) и в базовых осях (W_x , W_y , W_z). За базовый принимается трехгранник осей, связанных с корпусом ЛЧЭ М-40, в котором ось Z номинально соответствует оси вибрации, формирующей знакопеременную подставку. При испытаниях ЛЧЭ или при установке на объекте ось Z обычно соответствует вертикальной строительной оси, а оси X и Y лежат в горизонтальной плоскости.

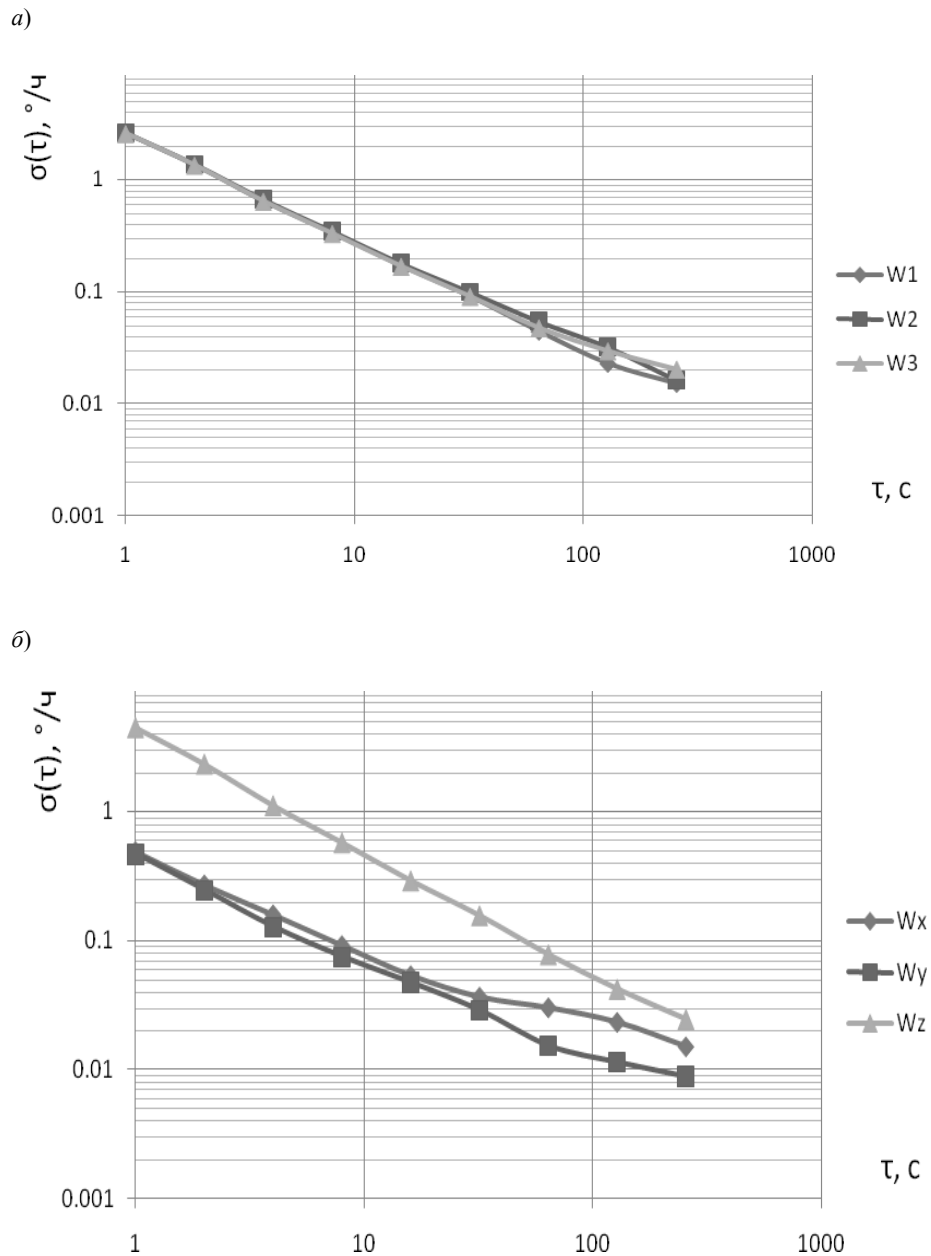


Рис. 7. Результат анализа вариации Аллана выходных сигналов ТЛГ М-40 в осях чувствительности (а) и в базовых осях (б)

Из диаграмм видно, что в проекциях на базовые оси максимальная случайная составляющая дрейфа угловой скорости наблюдается по оси Z, совпадающей с осью вибрации. Это обусловлено погрешностью датчика углового положения резонатора, используемого для компенсации вибрационной подставки. Для снижения этой погрешности необходима как отработка схемотехники тракта преобразования сигнала датчика углового положения, так и оптимизация алгоритмов управления вибрационной подставкой.

Заключение

В условиях замкнутого технологического цикла серийного производства изготовлены опытные образцы малогабаритного трехкомпонентного лазерного гироскопа, чувствительный элемент которого может быть размещен в корпусе диаметром и высотой 90 мм. На основании результатов испытаний опытных образцов при серийном производстве можно ожидать достижения следующих точностных характеристик: случайный дрейф от 0,005 до $0,01^\circ/\sqrt{\text{ч}}$, стабильность смещения нуля от 0,015 до 0,03 град/ч.

На основе гироскопа с такими характеристиками, может быть разработана малогабаритная бесплатформенная инерциальная навигационная система средней точности. Предварительная проработка конструкции показала, что объем такой системы не будет превышать 5 дм³, а точность определения координат в автономном режиме от 3,7 до 7,5 км за 1 ч полета.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов, В. Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. -2011. - № 1.- С. 3-16.
2. **Bonnaudet E., Robert Ph.** Three axis monolithic Ring Laser Gyro for inertial Navigation // II Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам. - СПб.: ГИЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 1996.
3. **Чумаков, А.В.** Достижение навигационного класса точности трехкомпонентного лазерного гироскопа в серийном производстве / А.В. Чумаков [и др.] // XVI Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам.- СПб.: ГИЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009. С 31-33.
4. **Titterton, D. H. (David H.)** Strapdown inertial navigation technology. 2nd ed. // Institution of Electrical Engineers, 629.T351, ISBN 0 86341 358 7.
5. **Федоров, А. Е.** Компенсация инструментальных погрешностей трехкомпонентного лазерного гироскопа моноблочной конструкции / А.Е.Федоров, Д.А.Рекунов // XVI Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ГИЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – С. 42-47.

Abstract. A small-sized trinary laser gyroscope (TLG) M-40 has been developed by RIEP Plc to be applied in navigating systems and positioning systems of midrange accuracy class imposing higher standards to weight-and-dimensional characteristics, device stability to external mechanical impacts and functional readiness time. TLG M-40 is a self-contained orientation parameters meter with data release in digital form.

Key words: laser gyroscope, navigation.