

**Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции  
и ордена Трудового Красного Знамени  
государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**

---

Барыкин В.В., Кулешов А.В., Подчерцев В.П., Щеглова Н.Н.

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**к лабораторной работе по курсу  
«Гирскопические приборы и системы ориентации»**

**Лазерный гироскоп**

**Цель работы** – ознакомление с принципом действия и конструкцией лазерного гироскопа, с методикой проведения испытаний; экспериментальное определение выходной характеристики в режиме датчика абсолютной угловой скорости.

**Назначение прибора** – измерение проекции абсолютной угловой скорости основания на ось чувствительности прибора, т.е. на ось, перпендикулярную плоскости замкнутого оптического контура (резонатора). Лазерный гироскоп (ЛГ), работающий в режиме датчика угловой скорости, находит применение в навигационных системах как платформенного, так и бесплатформенного типов. Он может быть использован в качестве чувствительного элемента систем автономного определения азимутальных направлений (лазерный гироскоп), а также в системах ориентации.

**Особенности и основные характеристики ЛГ** по сравнению с классическими гироскопами:

- ❖ отсутствие вращающегося ротора;
- ❖ моноблочность и высокая механическая стойкость конструкции;
- ❖ работоспособность при больших линейных перегрузках;
- ❖ высокая чувствительность;
- ❖ большой диапазон измеряемых угловых скоростей –  $3 \cdot 10^{-6} \dots 3000 \text{ } \%$ ;
- ❖ малый собственный дрейф –  $5 \cdot 10^{-2} \dots 10^{-2} \text{ } \%$ ;
- ❖ малое время готовности  $< 0,1 \text{ с}$ ;
- ❖ малая потребляемая мощность – до 10 Вт;
- ❖ большой ресурс работы  $> 10^3 \text{ ч}$ ;
- ❖ высокая надежность;
- ❖ дискретность выходного канала.

### Принцип работы

В основу работы ЛГ положен эффект, который состоит в том, что во вращающейся системе координат время прохождения электромагнитной волны по замкнутому контуру отличается от времени её прохождения по тому же контуру в системе координат, неподвижной в инерциальном пространстве, и различно для волн, проходящих во встречных направлениях.

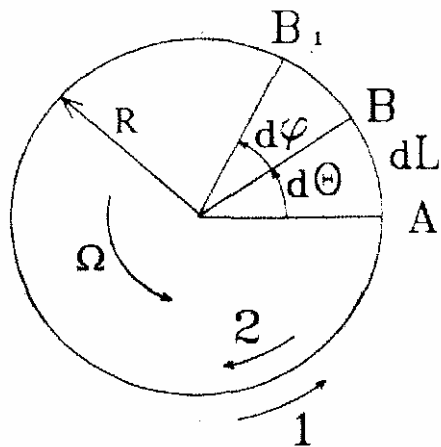


Рис.1

Рассмотрим замкнутый оптический контур, по периметру которого распространяются во встречных направлениях две электромагнитные волны 1 и 2, показанные стрелками на рис. 1. Условие генерации в таком контуре состоит в том, чтобы на длине его периметра  $L$  укладывалось целое число длин волн:

$$L = N\lambda = N \frac{c}{f}, \quad (1)$$

где  $N$  – целое число;  $\lambda$  – длина волны, генерируемая в контуре, м;  $f$  – частота излучения, Гц;  $c$  – скорость света, м/с. Согласно формуле (1), частота генерируемого излучения в неподвижном контуре

$$f = N \frac{c}{L}, \quad (2)$$

а время обхода его периметра оказывается одинаковым и равным  $t=L/c$ .

Пусть контур вращается в абсолютном пространстве с угловой скоростью  $\Omega$ , вектор которой перпендикулярен плоскости контура. Выделим на контуре произвольный отрезок  $AB$  длиной  $dL = R d\Theta$ . При перемещении электромагнитной волны 1 из точки  $A$  на расстояние  $dL$  за время  $dt = dL/c$  точка  $B$  займет положение  $B_1$ , сместившись на угол

$$d\varphi = \Omega dt = \Omega dL/c = R\Omega d\Theta/c. \quad (3)$$

Чтобы попасть в точку  $B_1$ , электромагнитная волна должна пройти дополнительный отрезок контура, равный  $Rd\varphi$ , на это потребуется дополнительное время

$$d\tau = R d\varphi/c = R^2\Omega d\Theta/c^2. \quad (4)$$

Для обхода всего контура электромагнитной волне потребуется дополнительное время

$$\tau = \int d\tau = \frac{2\pi R^2\Omega}{c^2} = \frac{2S\Omega}{c^2}, \quad (5)$$

где  $S$  – площадь контура.

Эквивалентное изменение периметра контура для электромагнитной волны 1 составит

$$\Delta L = \tau c = \frac{2S\Omega}{c}. \quad (6)$$

В том случае, если замкнутый контур, изображенный на рис. 1, представляет собой резонатор кольцевого оптического квантового генератора (КОКГ), изменение его периметра при вращении приведет к изменению частоты настройки резонатора, т.е. произойдет его перенастройка, и частота электромагнитной волны 1 примет значение

$$f_1 = \frac{cN}{L + \Delta L}. \quad (7)$$

Учитывая изменение эффективной длины оптического пути обоих лучей, запишем выражение для разностной частоты  $\Delta f$  двух электромагнитных волн, распространяющихся в кольцевом резонаторе навстречу друг другу

$$\Delta f = f_2 - f_1 = Nc \left( \frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_1} \right) = Nc \frac{L_1 - L_2}{L_1 L_2} = 2Nc \frac{\Delta L}{(L^2 - \Delta L^2)}. \quad (8)$$

Здесь  $L_1 = L + \Delta L$  и  $L_2 = L - \Delta L$  – пути, проходимые по контуру лучами 1 и 2 соответственно.

С учетом (1) и (6) выражение (8) после преобразований примет вид

$$\Delta f = \frac{4S\Omega}{L\lambda} = k\Omega, \quad (9)$$

где  $k = 4S/L\lambda$  – масштабный коэффициент ЛГ.

Таким образом, разностная частота на выходе кольцевого резонатора прямо пропорциональна угловой скорости вращения основания. Эту частоту легко измерить путем гетеродирования встречных волн, в результате чего выделяется частота биений суммарного сигнала. Подсчет числа биений суммарного сигнала позволяет получить информацию об угле поворота резонатора в инерциальном пространстве.

### Основные погрешности ЛГ

Из выражения (9) следует, что частота выходного сигнала идеального ЛГ пропорциональна проекции абсолютной угловой скорости вращения основания на ось чувствительности, перпендикулярную плоскости резонатора ЛГ. Выходная характеристика идеального ЛГ, показанная пунктиром 1 на рис. 2, представляет собой зависимость разностной частоты от угловой скорости вращения основания. Она имеет вид прямой, проходящей через начало координат, тангенс угла которой равен масштабному коэффициенту ЛГ.

Любой эффект, который приводит к отклонению характеристики от данной прямой линии, должен рассматриваться как источник погрешностей. Основные причины, вызывающие погрешности:

- ❖ смещение (уход) нуля;
- ❖ синхронизация частот встречных волн (явление захвата частот);
- ❖ многомодовый характер излучения;
- ❖ нестабильность масштабного коэффициента ЛГ;
- ❖ флуктуации фазы и частоты излучения;
- ❖ влияние внешних периодических возмущений.

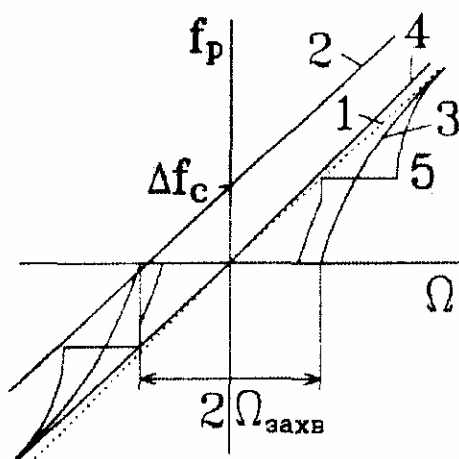


Рис. 2

#### Смещение нуля

(прямая 2 на рис. 2) вызывает погрешность ЛГ, эквивалентную обычному дрейфу механического гироскопа. Сдвиг нуля объясняется возникновением в полости гироскопа газовых потоков, дрейфом носителей тока в кольцевом резонаторе и влиянием внешних магнитных полей. Существование газовых потоков в гироскопе, квантовые генераторы которого питаются постоянным током, определяется столкновением молекул газа со стенками полостей гироскопа, распределе-

ниями электрического заряда вдоль стенок и электрического поля по ходу разряда газа. Лазерный луч сконцентрирован в центральной части полости гироскопа и проходит через газ, движущийся к катоду. Обратный ток газа происходит вдоль стенок трубки. Перемещение газа приводит к изменению показателя преломления, зависящего от относительных направлений перемещений энергии в лазерном луче и газовом потоке. Поэтому полость гироскопа в одном направлении будет казаться несколько длиннее, чем в другом. Это явление приводит к сдвигу нуля гироскопа. Для КОКГ, содержащего оптическую среду с коэффициентом преломления  $n$ , движущуюся по контуру резонатора со скоростью  $V_c$ , частотный сдвиг выходной характеристики будет равен

$$\Delta f_c \cong 2(n^2 - 1)V_c / \lambda.$$

В гироскопе, имеющем только один анод, смещение нуля обычно оказывается эквивалентным входной скорости вращения до 0,1 %. Сдвиг нуля можно уменьшить, если гироскоп выполнить в виде симметричной конструкции с двумя анодами и одним катодом и осуществить балансировку анодных токов до получения минимального значения этого сдвига.

Защита от внешних магнитных полей осуществляется специальным защитным кожухом.

#### Синхронизация частот встречных волн

приводит к тому, что при уменьшении скорости вращения (поворота) гироскопа разность частот приближается к нулю быстрее, чем скорость углового вращения гироскопа. В результате на малых скоростях поворота ошибки измерения угловой скорости недопустимо увеличиваются, а на самых малых скоростях (0,03 %/с) гироскоп уже не регистрирует начального поворота (характеристика 3 на рис. 2). Происходит так называемый захват частот колебаний одного генератора другим вследствие взаимного влияния двух генераторов.

Захват лучей, распространяющихся в противоположных направлениях, связан с их обратным рассеянием, поэтому уменьшение зоны захвата сводится прежде всего к уменьшению этого рассеяния, которое достигается за счет оптимизации конструкции и основных параметров (улучшения качества отражающих поверхностей, вакуумирования, снижения влияния плазмы активного вещества, увеличение периметра резонатора, уменьшения длины волны используемого излучения, увеличение диаметра светового потока). Однако перечисленные пути уменьшения зоны захвата не позволяют полностью устранить это явление. Поэтому в современных ЛГ используется ряд специальных методов, позволяющих преднамеренно создать начальную разность частот и сместить рабочую точку ЛГ из зоны захвата в линейную зону.

Методы устранения явления захвата основаны на придании гироскопу принудительного вращения (действительного или кажущегося) с известной постоянной скоростью. Это позволяет при измерении малых скоростей поворота сместить рабочие характеристики гироскопа в область более высоких скоростей, лежащих вне зоны чувствительности, где явление захвата световых колебаний не наблюдается. В

этом случае результирующая скорость вращения лазерного гироскопа представляет собой алгебраическую сумму истинной скорости и скорости смещения.

Простейшим способом реализации частотной подставки являются колебания корпуса резонатора ЛГ около положения равновесия или искусственное вращение со скоростью, превышающей порог захвата относительно нормали к плоскости контура. Смещение рабочей точки может быть фиксированным или периодическим.

Один из способов реализации знакопеременной подставки основан на применении явления увлечения Френеля-Физо (принудительном движении оптически плотной среды с известной скоростью). Для реализации этого способа необходимо введение в резонатор оптически прозрачной движущейся среды или прокачка воздуха в канале. Целый ряд способов реализации частотной подставки основан на магнитооптических явлениях: эффектах Зеемана (расщепление спектральных линий, вызванное воздействием на атомы магнитного поля); Фарадея (изменение показателя преломления (оптической длины) при воздействии на вещество магнитным полем (поворот плоскости поляризации)); Керра (расщепление спектральных линий в средах, к которым приложено электромагнитное поле).

#### Многомодовый характер излучения

объясняется тем, что в пределах линии, обусловленной доплеровским уширением, в резонаторе ЛГ могут возбуждаться несколько отдельных колебаний (мод) с разными частотами. При вращении гироскопа с угловой скоростью  $\Omega$  многомодовый режим генерации приводит к расщеплению каждой моды на две частоты. При этом разности частот биений соседних мод будут несколько отличаться друг от друга, что затрудняет четкое выделение сигнала разностной частоты и оценку угловой скорости вращения. Поэтому в реальных конструкциях гироскопов на лазерах стремятся обеспечить одномодовый режим генерации.

Для подавления нежелательных видов колебаний в современных гироскопах применяют диафрагму, установленную в одном из каналов резонатора, или регулируют коэффициент усиления активной среды лазера таким образом, чтобы на всех модах, кроме одной, усиление не компенсировало активных потерь резонатора (то есть условие генерации не выполнялось). В этом случае генерация возникает только на одной частоте.

#### Нестабильность масштабного коэффициента ЛГ

объясняется в основном возможными изменениями геометрии резонатора ЛГ, а также нестабильностью коэффициента преломления активной среды из-за ее дисперсионной характеристики (прямая 4 на рис. 2). В связи с этим моноблок изготавливается из материала, имеющего малый коэффициент температурного расширения (например, ситалла). Основными методами, позволяющими стабилизировать масштабный коэффициент, является использование специальной схемы автоподстройки периметра ЛГ и применение в качестве активной среды стабильных и однородных газовых сред при малых давлениях. Также для этих целей применяются специальные схемы стабилизации длины периметра контура. Их работа основана на изменении положения отражателя или показателя преломления среды, что может быть достигнуто изменением плотности среды в одном из каналов.

### Нестабильность фазы и частоты излучения

в конечном счете определяется спонтанной эмиссией фотонов активного вещества. Фаза основного излучения может измениться на величину, пропорциональную общему количеству спонтанно излученных фотонов. Изменения в этом случае были бы весьма существенными. Но так как фазы излучения не совпадают, то флуктуации величины фазы и излучения невелики. Однако этот фазовый сдвиг носит случайный характер. При этом разброс частоты основного излучения для газовых лазеров лежит в пределах от 0,001 до 1 Гц. Практически точность измерения угловой скорости ограничивается минимальным значением фазы, которую можно измерить фотодетектором. Однако следует ожидать, что с усовершенствованием технологии изготовления лазерных гироскопов и их элементов точность измерения угловых положений приблизится к пределам, определяемым флуктуациями фазы и частоты генератора.

### Влияние внешних периодических возмущений на ЛГ

связано в основном с вибрацией зеркал, а также с пульсацией напряжения, питающего элементы накачки КОКГ и др. При приближении частоты внешних воздействий к частоте биений двух встречных волн вследствие возникновения параметрических явлений может произойти захват, или синхронизация разностной частоты (так называемая параметрическая синхронизация). Это приводит к тому, что в некотором диапазоне изменения угловой скорости вращения основания разностная частота остается постоянной (кривая 5 на рис. 2). Ширина образующейся полосы захвата определяется параметрами системы и интенсивностью внешних возмущений. Для уменьшения влияния вибраций конструкция ЛГ должна быть предельно жесткой.

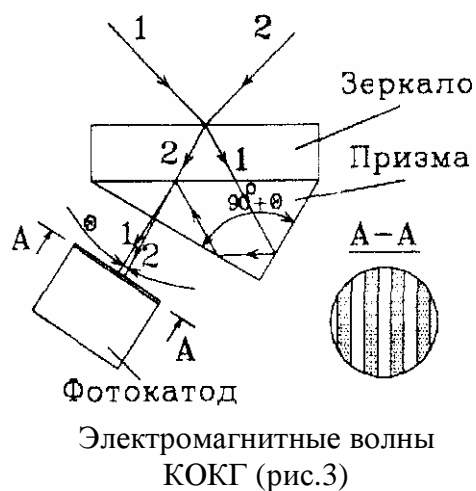
### Конструкция ЛГ

Современный ЛГ представляет собой сложную оптико-электронную систему, основным элементом которой является КОКГ. Конструктивно ЛГ выполняется в виде монолитного блока из высококачественного кварца или ситалла, в котором имеются каналы, образующие единый четырехугольный или треугольный контур.

По углам оптического контура расположены зеркала с высоким коэффициентом отражения (или призмы полного внутреннего отражения), образующие кольцевой резонатор. Для обеспечения высокой жесткости конструкции отражатели соединяют с моноблоком методом молекулярной адгезии, для чего контактирующие поверхности выполняются предельно плоскими и тщательно полируются, внутренние полости блока заполняются активным веществом, в качестве которого используется смесь гелия и неона при давлении около  $6 \cdot 10^2$  Па. В моноблоке расположены также электроды (анод и катод), необходимые для возбуждения активной среды. На электроды подается высокое напряжение, которое ионизирует газ и создает тлеющий разряд. Возникающее при этом незатухающее излучение когерентно, т.е. имеет одну и ту же частоту, положение фазы и плоскость колебания.

В одном из газоразрядных резонаторов устанавливается диафрагма, управление которой дает возможность получить одномодовый режим работы, при котором ОКГ генерирует излучение в одной узкой полосе спектра.

Для выделения сигнала разностной частоты встречные лучи проходят через совмещающую призму и попадают на фотоэлектронный умножитель или фотокатод



оптического детектора, имеющий две узкие чувствительные площадки, ориентированные вдоль светлых и темных полос. При этом площадки фотоприемника отстоят друг от друга на расстояние, равное  $1/4$  части периода интерференционной картины. Таким образом, световой сигнал преобразуется в электрический. На рис. 3 показан ход лучей в устройстве съема выходного сигнала.

На двух выходах фотоприемника, связанных с чувствительными площадками, наблюдаются два сигнала синусоидальной формы с фазовым сдвигом  $90^\circ$ . Информация об угле поворота кольцевого лазера содержится в изменении фазы

каждого сигнала. При этом в случае вращения прибора против часовой стрелки фаза первого сигнала опережает на  $90^\circ$  фазу второго сигнала, а в случае вращения по часовой стрелке фаза второго сигнала опережает фазу первого сигнала на те же  $90^\circ$ . Таким образом, производя фазовый анализ сигналов, можно определить угол поворота кольцевого лазера и направление его вращения.

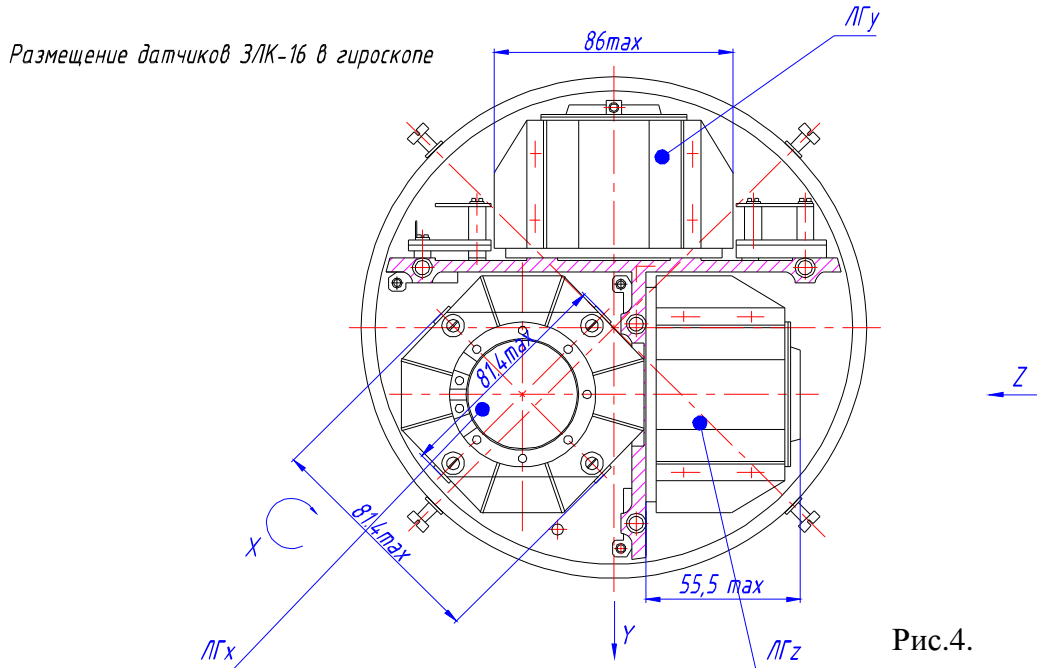
Основной чувствительный элемент (моноблок с КОКГ) современного ЛГ работает со многими подсистемами, которые призваны ликвидировать влияние отдельных дестабилизирующих факторов и улучшить его характеристики. К ним относятся подсистема регулирования мощности накачки, подсистема стабилизации частоты излучения и стабилизации периметра резонатора, а также подсистема частотной подставки кинематического или электрического типа. Кроме того, в состав ЛГ входят подсистемы съема и преобразования выходной информации.

#### **Технические характеристики трехосного лазерного гироскопа МТ-5М:**

- ❖ Габариты: высота 140 мм, диаметр 180 мм;
- ❖ В трехосный ЛГ входят три одноосных (однокомпонентных) датчика ЗЛК-16, имеющие следующие характеристики:
  - Тип лазера: газовый (He-Ne) кольцевой;
  - Периметр: 20 см;
  - Измеряемые скорости:  $\pm 400 \text{ } \frac{\circ}{\text{с}}$ .
  - Дрейф нуля:  $1..30 \text{ } \frac{\circ}{\text{ч}}$ ;
  - Тип подставки: Зеemanовская частотная подставка;
  - Стабильность масштабного коэффициента:  $10^{-4} \text{ } \frac{\circ}{200}$ ;
  - Линейность выходной характеристики:  $10^{-4} \text{ } \frac{\circ}{200}$ ;
  - Нарботка на отказ: 500 ч;
  - Время непрерывной работы прибора: до 3 мин;



- Время непрерывной работы лазера: 8 ч;
- Рабочая температура: -55..60 °С;
- Удары: до 100g;
- Вибрации: амплитуда 30g частота 2...10000 Гц.



### **Методика испытаний**

- 1) Снятие выходной характеристики прибора  $\Delta f = f(\Omega_{осн})$  и вычисление масштабного коэффициента гироскопа:

Проводятся измерения частоты выходного сигнала ЛГ для соответствующих значений угловой скорости  $\Omega_{осн}$ .

Строится выходная характеристика ЛГ и находится масштабный коэффициент.

- 2) Исследование нелинейности выходной характеристики гироскопа:

Под нелинейностью характеристики понимается характеристика, не описываемая строго линейной зависимостью.

- 3) Исследование изменения температуры прибора:

Для исследований используется Зеemanовская частотная подставка

$$T_i(F) = \frac{(F - S_0)K}{(-SumTime)} - T_0, \text{ где}$$

$T_i$  – температура, °С;

$F$  – частота подставки, Гц;

$SumTime$  – время счёта сумм, мс.

$S_0$  – частота подставки при температуре  $T_0$ , Гц;

$T_0$  – температура, для которой известна  $S_0$ , °С;

$K$  – переводной коэффициент  $\left(\frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{мс}}{\text{Гц}}\right)$ .

Модель прогрева гироскопов выглядит следующим образом:

$$T(t, T_0) = -\Delta T_{\text{прогрева}} e^{-t/\tau_{\text{прогрева}}} + T_0, \text{ где}$$

$\tau_{\text{прогрева}}$  – время прогрева прибора - определяется конструкцией прибора;

$\Delta T_{\text{прогрева}}$  – константа, определяющая суммарный прогрев прибора за время работы;

$t$  – время;

$T_0$  – стартовая температура (в нашем случае  $22^{\circ}\text{C}$ ).

#### 4) Исследование дрейфа нуля гироскопа

Одной из основных ошибок, с которой приходится бороться в лазерных гироскопах, является дрейф «нуля». Он имеет систематическую и случайную составляющие:

➤ Систематическая составляющая дрейфа «нуля»  $\Omega_{\text{sys}}(t, T)$  имеет вид:

$$\Omega_{\text{sys}}(t, T) = A_1(T) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1(T)}} A_2(T) \cdot t + A_3(t), \quad (*)$$

где  $e^{-\frac{t}{\tau_1(T)}}$  при  $t = (20 \text{ с} - 3 \text{ мин})$ ;  $e^{-\frac{t}{\tau_2(T)}}$  при  $t = (20 \text{ мин} - 1 \text{ ч})$ .

$t$  – время;  $T$  – температура.

➤ Случайная составляющая обусловлена:

- физическими процессами;
- ошибками квантования.

$\Omega_{\text{rand}}(\xi) = A_5 \cdot f(\xi)$ , где  $f(\xi)$  – функция Гауссова распределения.

**Суммарный дрейф лазерного гироскопа, таким образом, имеет вид:**

$$\Omega_{\text{dr}} = \Omega_{\text{sys}}(t, T) + \Omega_{\text{rand}}(\xi).$$

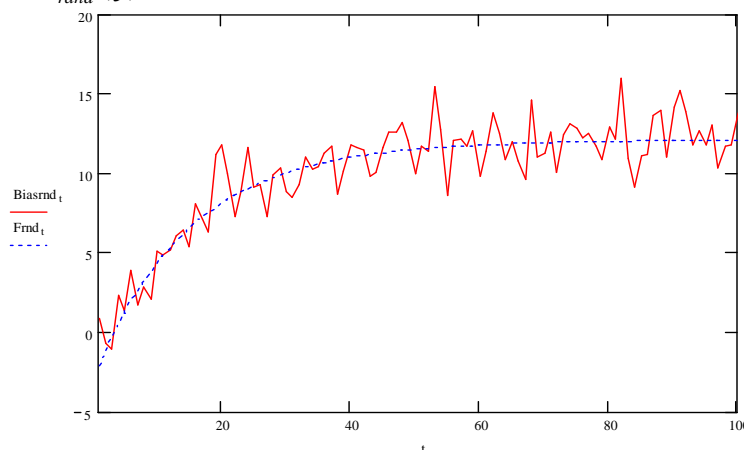


Рис.5.

На графике пунктиром изображена модель систематического дрейфа ЛГ.

Для алгоритмической компенсации систематической составляющей дрейфа ЛГ необходимо иметь математическую модель этой систематической составляющей. Модель систематической составляющей дрейфа ЛГ получают путём аппроксимации функции вида (\*) экспериментальных данных при отсутствии вращения основания. Аппроксимация проводится методом наименьших квадратов.

Выходные данные ЛГ при алгоритмической компенсации имеют вид:

$$\Omega = \Omega_{ЛГ} - \Omega_{sys} .$$

### Описание лабораторной установки

Для экспериментального исследования ЛГ в режиме датчика абсолютной угловой скорости используется лабораторная установка, схема которой приведена на рис 6.

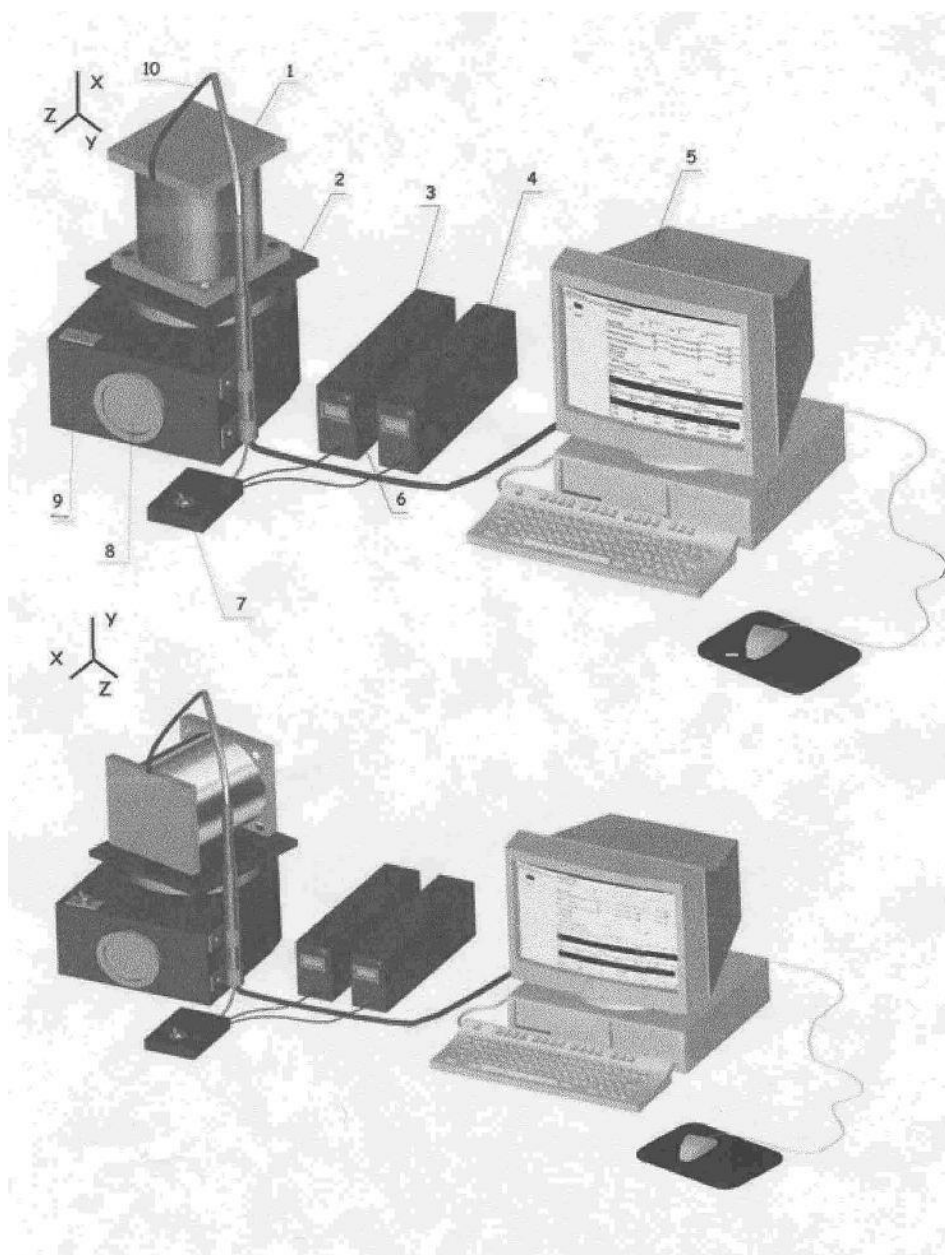


Рис.6.

Лабораторная установка включает в себя:

1. - лазерный гироскоп
2. - поворотный стол
3. - источник постоянного питания 27В 1,5А
4. - источник постоянного питания 5В 2А
5. - персональный компьютер с платой «счетчик импульсов»

Элементы управления:

6. - выключатель источника постоянного питания 27В
7. - выключатель питания установки
8. - диск выбора скорости
9. - переключатель режимов поворотного стола
10. - провода передачи данных и питания ЛГ

Гироскоп установлен на поворотном столе, который позволяет поочередно осуществлять повороты по трем осям. Выключатель питания позволяет синхронно включать и выключать питание 27В и 5В гироскопа.

### Описание пользовательского интерфейса программы обработки результатов экспериментов

На рисунке 7 представлено основное окно программы:

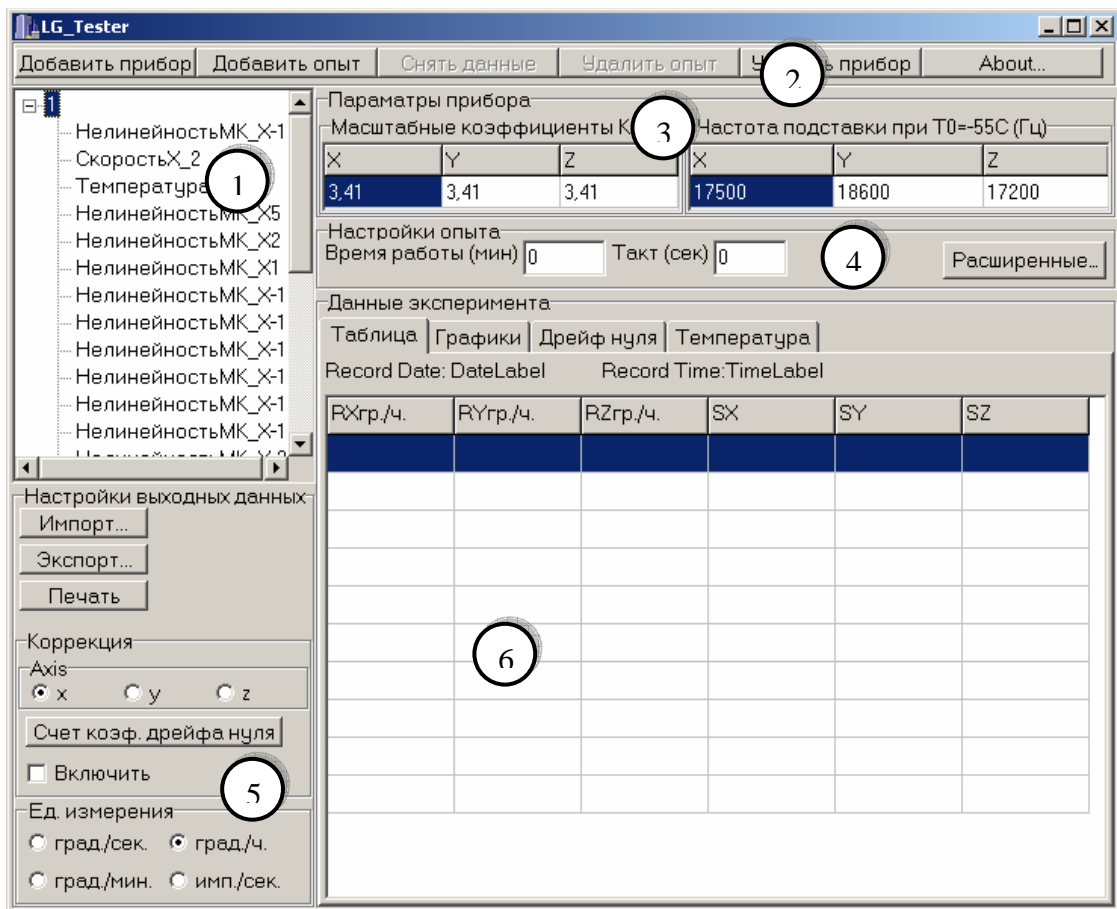


Рис. 7

1 – список экспериментов, 2 – панель управления, 3 – панель параметров прибора, 4 – панель настроек опыта, 5 – панель настройки выходных данных, 6 – панель данных эксперимента.

### Последовательность проведения эксперимента

1. Перед проведением экспериментов убедиться, что выключатель питания установки (7) находится в положении ВЫКЛЮЧЕНО (« $\perp$ »).

2. Проверить, не перекручены ли провода передачи данных и питания ЛГ (10). Если провода перекручены, то исправить это, поворачивая вручную гироскоп (1) на поворотном столе (2).

3. Включить персональный компьютер (5).

4. Включить источник питания 27В выключателем на передней панели БП (6).

5. Подключить к сети источник питания 5В (4).

6. Запустить программу обработки результатов эксперимента «ЛР Лазерный гироскоп».

7. Выбрать эксперимент в списке <1> для прибора 1.

8. При необходимости провести дополнительные эксперименты, создать новый эксперимент для прибора МТ-5М. Для чего выделить прибор в списке <1>, который будет использоваться (в нашем случае 1), нажать кнопку «Добавить опыт» на панели <2> и задать название опыту. Задать параметры съёма информации (панель <4>): время работы (в минутах) и такт съёма (в секундах), причём максимальное время работы прибора не должно превышать 3 минут; а так же эмпирические параметры, нажав кнопку «Расширенные...»: Control Data Ready Time – 2 с, Delay Time – 2800 мс, Sum Calculation Time – 100 мс.

9. Выбрать скорость вращения с помощью диска (8).

10. Включить вращение поворотного стола с помощью тумблера (9), если иное не оговорено в эксперименте, учитывая, что левое положение тумблера соответствует вращению против часовой стрелки « $-\Omega$ », среднее положение тумблера – отключено ( $\Omega=0$ ), правое положение тумблера – вращению по часовой стрелке « $+\Omega$ ».

11. Перевести выключатель синхронной подачи питания установки (7) в положение ВКЛЮЧЕНО (« $\perp$ »).

12. Провести съём данных, для чего нажать в программе на кнопку «Снять данные» на панели <2>.

13. По завершении съёма данных, при появлении сообщения «Выключите питание (27В). Нажмите любую клавишу.», необходимо перевести выключатель (7) в положение ВЫКЛЮЧЕНО (« $\perp$ »), выключить поворотный стол, установив тумблер (9) в среднее положение и нажать любую клавишу на клавиатуре компьютера.

По завершению работы с установкой отключить источник питания 5В (4) от сети и выключить источник питания 27В (6).

14. Провести анализ полученных данных, используя панели <5> и <6>.

15. По окончании анализа завершить работу с программой и выключить компьютер.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с принципом действия и конструкцией ЛГ по описанию и макету прибора.
2. Ознакомиться с лабораторной установкой и порядком проведения эксперимента.
3. Экспериментальная часть:

Задание 1. Снять выходную характеристику прибора  $f=f(\Omega)$ :

Перед каждым новым съёмом данных дать прибору остыть не менее 2 минут.

Выбрать эксперименты: «МК\_Хn», где  $n$  – скорость вращения поворотного стола вокруг оси  $X$   $\% / c$ , задаваемая диском (8). Для всех экспериментов время работы – 1 мин, такт съёма – 6 с,  $\omega_y = \omega_z = 0$ .

Последовательно провести десять экспериментов и заполнить таблицу 1 (в качестве единицы измерения выбрать в программе  $\frac{\text{импульс}}{c}$  на панели <5>), рассчитать среднее значение  $f_{cp}$ :

Таблица 1

№ п/п	Разностная частота $\Delta f, \frac{\text{импульс}}{c} (\Gammaц)$				
	2 $\% / c$	4 $\% / c$	6 $\% / c$	8 $\% / c$	10 $\% / c$
1					
2					
...					
10					
$\Delta f_{cp}, \Gammaц$					
№ п/п	Разностная частота $\Delta f, \frac{\text{импульс}}{c} (\Gammaц)$				
	-2 $\% / c$	-4 $\% / c$	-6 $\% / c$	-8 $\% / c$	-10 $\% / c$
1					
2					
...					
10					
$\Delta f_{cp}, \Gammaц$					

Построить график изменения выходного сигнала ЛГ в функции входной угловой скорости, по графику определить масштабный коэффициент ЛГ  $K$  и записать в отчёт. Проанализировать полученный результат.

Задание 2\*. Исследовать нелинейность выходной характеристики прибора.

Перед каждым новым съёмом данных дать прибору остыть не менее 2 минут.

Выбрать эксперименты: «НелинейностьМК\_Xn», где  $n$  – скорость вращения поворотного стола вокруг оси  $X$   $\% / c$ , задаваемая диском (8). Для всех экспериментов время работы – 1 мин, такт съёма – 2 с,  $\omega_y = \omega_z = 0$ .

Последовательно провести четыре эксперимента.

В эксперименте необходимо учитывать, что 10% времени работы гироскопа (определяется по положению индикатора в программе съёма данных) тумблер (9) находится в среднем положении ( $\omega_x = 0$ ), 30% – в правом положении (вращение со скоростью  $+\omega_x$ ), следующие 20% – в среднем положении ( $\omega_x = 0$ ), 30% – в левом положении ( $-\omega_x$ ), и оставшиеся 10% в среднем.

Заполнить таблицу 2, взяв по десять значений из положительных и отрицательных значений, найти среднее значение  $f_{cp}$  – это необходимо для того, чтобы убрать постоянную и линейную составляющие дрейфа нуля:

Таблица 2

№ п/п	Разностная частота $\Delta f$ , импульс/ $c$ (Гц)			
	1 $\% / c$	2 $\% / c$	5 $\% / c$	10 $\% / c$
1				
2				
...				
10				
	-1 $\% / c$	-2 $\% / c$	-5 $\% / c$	-10 $\% / c$
1				
2				
...				
10				
$\Delta f_{cp}$ , Гц				
$K$ , импульс/ $\% \left( \frac{1}{градус} \right)$				

Подсчитать масштабные коэффициенты  $K = \frac{f_{cp}}{\Omega_x}$ , где  $\Omega_x$  – значение угловой скорости, установленной диском (8). Построить график изменения  $K$  от величины

угловой скорости вращения, объяснить полученный результат и сравнить с результатом, полученным в пункте 1.

Задание 3\*. Изучить аппроксимацию дрейфа гироскопа математической моделью, получить графики изменения температуры чувствительных элементов.

*Примечание: вращением Земли и нелинейностью масштабного коэффициента пренебречь.*

Эксперимент проводится на неподвижном основании:  $\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$ .

Выбрать эксперимент «Температура» с параметрами: время работы – 3 мин, такт – 6 с.

Зарисовать график изменения скорости, температуры и дрейфа от времени.

Проанализировать графики и объяснить полученный результат.

Задание 4\*. Изучить алгоритмические методы компенсации дрейфа.

Выбрать эксперимент «Дрейф»: время работы – 3 мин, такт – 6 с.

Задать угловую скорость диском (8)  $\omega_x = 2 \text{ }^\circ/\text{с}$ ;  $\omega_y = \omega_z = 0$ .

При помощи программы провести коррекцию дрейфа, зарисовать скорректированный и нескорректированный график зависимости скорости от времени. Оценить правильность работы алгоритма коррекции.

**\*) Примечание: задания 2 – 4 при проведении лабораторной работы по курсу «ГПиСО» выполняются факультативно!**

4. Составить отчёт, который должен содержать: краткое описание принципа действия и конструкции ЛГ; упрощенную принципиальную схему прибора; основные погрешности ДУСа и технические характеристики гироскопа МГ-5М; результаты экспериментов и расчётов, графики.

#### **Контрольные вопросы**

1. Назовите назначение и области применения ЛГ.
2. Какие отличительные особенности ЛГ вы знаете?
3. Как расположена ось чувствительности ЛГ?
4. Назовите основные погрешности ЛГ и причины, их вызывающие.
5. Какие существуют методы борьбы с явлением «захвата частот»?
6. Какие составляющие входят в математическую модель дрейфа ЛГ?
7. Каким образом осуществляется стабилизация периметра резонатора?
8. Каким образом можно провести алгоритмическую компенсацию дрейфа?



**Список рекомендуемой литературы**

- Бычков С.И., Лукьянов Д.П., Бакаляр А.И. Лазерный гироскоп. /Под ред. проф. Бычкова С.И. – М.: Советское радио, 1975. – 424 с.
- А.Д. Богданов. Гироскопы на лазерах. – М.: Воениздат, 1973.
- Б.Ф. Фёдоров, А.Г. Шереметьев, В.Н. Умников. Оптический квантовый гироскоп. /Под ред. А.Г. Шереметьева. – М.: Машиностроение, 1973.
- Гироскопические системы: Гироскопические приборы и системы: Учеб. для вузов по спец. «Гироскоп. приборы и устройства» /Д.С. Пельпор, И.А. Михайлёв, В.А. Бауман и др.; Под ред. Д.С. Пельпора. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 424 с.
- В.Е. Джашитов, В.М. Панкратов. Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем /Под общ. Ред. В.Г. Пешехонова; РАН. Научный совет по проблемам управления движением и навигации. – СПб, 2001. – 149 с