

**ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное автономное образовательное**  
**учреждение высшего профессионального образования**  
**Национальный исследовательский университет**  
**«Высшая школа экономики»**

**Московский институт электроники и математики**  
**Национального исследовательского университета**  
**«Высшая школа экономики»**

**Кафедра кибернетики**

## **ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА**

**Методические указания к лабораторной работе**  
**по дисциплине «Системы управления, ориентации и навигации»**  
**(магистерская программа «Системы управления и информации**  
**в инженерии»)**

**Москва 2014**

Составители: к.т.н. Бессонов Алексей Станиславович, к.т.н. Колбас Юрий Юрьевич, к.т.н. Соловьева Татьяна Ивановна

УДК 629.13.054.6.001.12.001

Измерение характеристик лазерного гироскопа. Учебно-методическое пособие к лабораторной работе по дисциплине «Системы управления, ориентации и навигации» (магистерские программы «Лазерные интеллектуальные навигационные системы», «Системы управления и информации в инженерии») / Моск. ин-т электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»;

Сост.: А.С. Бессонов, Ю.Ю. Колбас, Т.И. Соловьева. М., 2014. – 31 с.

Учебно-методическое пособие содержит теоретические сведения, необходимые для выполнения лабораторной работы «Измерение характеристик лазерного гироскопа», а также описание порядка выполнения работы и требования к оформлению отчета. Предназначены для магистрантов, изучающих дисциплину «Системы управления, ориентации и навигации» (по направлению обучения 231300.68 «Прикладная математика» – магистерская программа «Системы управления и информации в инженерии»).

ISBN 978-5-94506-311-2

Данная работа выполнена в рамках гранта Минобрнауки Российской Федерации (Госконтракт №8037).

## Оглавление

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                       | 4  |
| 1. Теоретическая часть.....                                                                         | 5  |
| 1.1. Лазерные гироскопы .....                                                                       | 5  |
| 1.2. Получение информации об угловой скорости вращения.....                                         | 8  |
| 1.3. Погрешности лазерного гироскопа.....                                                           | 9  |
| 1.4. Эффект Зеемана и знакопеременная оптическая подставка.....                                     | 14 |
| 1.5. Экспериментальное измерение выходной характеристики.....                                       | 16 |
| 1.6. Экспериментальное определение масштабного коэффициента.....                                    | 16 |
| 1.7. Экспериментальное определение скорости вращения Земли,<br>географической широты и азимута..... | 17 |
| 2. Структурная схема лабораторной установки.....                                                    | 19 |
| 3. Подготовка к работе.....                                                                         | 20 |
| 4. Порядок выполнения работы.....                                                                   | 21 |
| 5. Контрольные вопросы.....                                                                         | 31 |
| Литература.....                                                                                     | 31 |

## **Введение**

В наше время наука об управлении движущимися объектами имеет особую значимость. Важное место занимают автономные и полуавтономные (интегрированные с GPS) инерциальные информационно-вычислительные системы, использующие для определения углового пространственного положения лазерные гироскопы (ЛГ).

(ЛГ) обладают многими преимуществами перед традиционными механическими, среди которых необходимо назвать следующие:

1. ЛГ более устойчивы к климатическим и механическим воздействиям, поскольку не имеют вращающейся массы.
2. ЛГ имеют малое время готовности.
3. Выходная информация об угле поворота в ЛГ выдается в цифровом виде.
4. Количество включений и выключений ЛГ практически не ограничено.

В настоящее время ЛГ достигли точности лучше  $0,001^\circ/\text{ч}$ , ресурса работы более 20 тысяч часов и времени сохраняемости более 20 лет.

В данной лабораторной работе исследуются характеристики ЛГ нового поколения, в которых для вывода из зоны захвата вместо виброподвеса используется магнитооптическая (зеemanовская) подставка, таким образом, ЛГ становится чисто оптическим прибором, не имеющим никаких движущихся механических частей, что обеспечивает ему дополнительные преимущества – более высокую устойчивость к жестким условиям эксплуатации и меньшие шумовые погрешности.

Лабораторная работа создана с использованием современных информационных технологий, которые уже продолжительное время используются в области измерений, проводимых на производстве, при выполнении научно-исследовательских работ, в клинической медицине и др. Исключением не является образовательный процесс, проводимый в высших и средних специальных учебных заведениях, где компьютерные измерения проводятся при выполнении лабораторных практикумов.

Лабораторный стенд данной лабораторной работы представляет собой виртуальную измерительную систему [1]. Объектом изучения здесь является ЛГ, построенный на основе зеemanовского кольцевого лазера. Необходимое управление объектом исследования, сбор, обработка измерительной информации и отображение результатов измерения осуществляется с помощью программного обеспечения персонального компьютера. Высокая степень автоматизации указанных процессов позволяет учащимся сосредоточиться на происходящих физико-технических процессах, что обеспечивает более эффективное достижение поставленной цели.

**Целью лабораторной работы** является изучение устройства, основ принципа работы и использования ЛГ, построенного на основе зеемановского кольцевого лазера.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- измерение выходных характеристик ЛГ;
- измерение масштабного коэффициента ЛГ;
- проведение гироскопических измерений скорости вращения Земли, географической широты и азимута.

## **1. Теоретическая часть**

### **1.1. Лазерные гироскопы**

*Лазерный гироскоп (ЛГ)* — оптический прибор для измерения угловой скорости. Он обычно применяется в системах инерциальной навигации.

Первым оптическим гироскопом можно считать пассивный интерферометр Саньяка [2, 3]. Трудность практического применения интерферометра Саньяка обусловлена его малой чувствительностью, т.к. практически получаемая разность оптических путей значительно меньше длины волны.

Анализ принципа действия ЛГ лучше всего начать с описания вращающегося кольцевого интерферометра (см. рис. 1.1), свойства которого впервые были исследованы Саньяком.

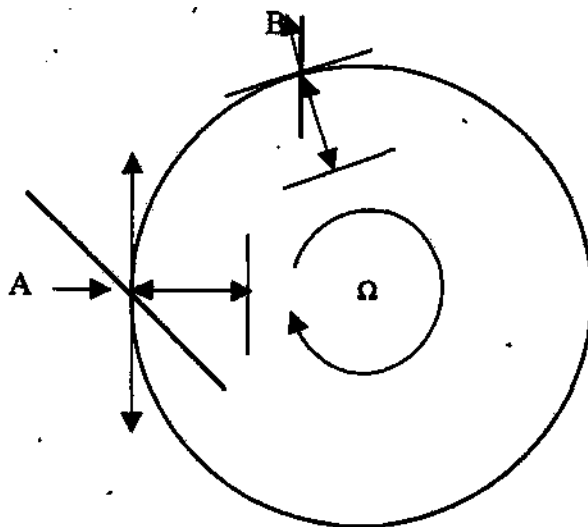


Рис. 1.1 Интерферометр Саньяка

Если данный интерферометр вращается с угловой скоростью  $\Omega$ , то времена  $t_+$  и  $t_-$  прохода вдоль всего контура лучей, распространяющихся из точки А по и против часовой стрелки, будут разными.

$$t_+ = (2\pi R)/(c - R\Omega), \quad (1)$$

$$t_- = (2\pi R)/(c + R\Omega), \quad (2)$$

где  $R$  — радиус интерферометра,

$c$  – скорость света в вакууме,

$\Omega$  – угловая скорость вращения интерферометра.

Разность данных времен составит

$$\Delta t = (t^+ + t^-) = 2\pi R((c + R\Omega - c + R\Omega)/(c^2 - (R\Omega)^2)) = 4\pi\Omega R^2 / c^2 = 4S\Omega / c^2. \quad (3)$$

Эта разность времен связана с разностью оптических путей для распространения света в противоположных направлениях по замкнутому контуру, которая равна согласно выражению (3),

$$\Delta L = c\Delta t = 4\pi\Omega R^2 / c. \quad (4)$$

Данное уравнение является основным при описании вращающегося интерферометра. Оно следует также из общей теории относительности, согласно которой часы, движущиеся на вращающейся платформе, не синхронны по отношению к часам в инерциальном пространстве. Это различие обуславливает разное время прохождения по замкнутому контуру для лучей, распространяющихся на вращающейся платформе в противоположных направлениях. Разность времен определяется выражением:

$$\Delta t = (2\Omega / C) \int \phi r^2 d\phi, \quad (5)$$

или

$$\Delta t = 4A\Omega / c^2, \quad \Delta L = 4A\Omega / c, \quad (6)$$

где  $A$  – площадь, охватываемая оптическим контуром.

Данные выражения можно обобщить для произвольной конфигурации резонатора.

Существенного повышения чувствительности к угловым скоростям удастся достичь путем применения активного интерферометра Саньяка – кольцевого лазера (рис. 1.2).

Лазерный резонатор образуется тремя или четырьмя зеркалами, расположенными по углам полости в форме треугольника или квадрата. Два лазерных луча, генерируемые и усиливающиеся в полостях гироскопа, непрерывно циркулируют по резонатору в противоположных направлениях, условно обозначенных знаками «+» и «-».

В кольцевом лазере с периметром  $L$  условие генерации можно записать в виде:

$$m\lambda_{\pm} = L_{\pm} \quad \text{или} \quad \nu_{\pm} = mc / L_{\pm}, \quad (7)$$

где  $m$  – число, характеризующее продольный тип колебаний ( $m = 10^5 \dots 10^6$ ),  $\lambda_{\pm}$  и  $\nu_{\pm}$  – длины волн и частоты колебаний, соответствующие периметрам  $L_{\pm}$  соответственно.

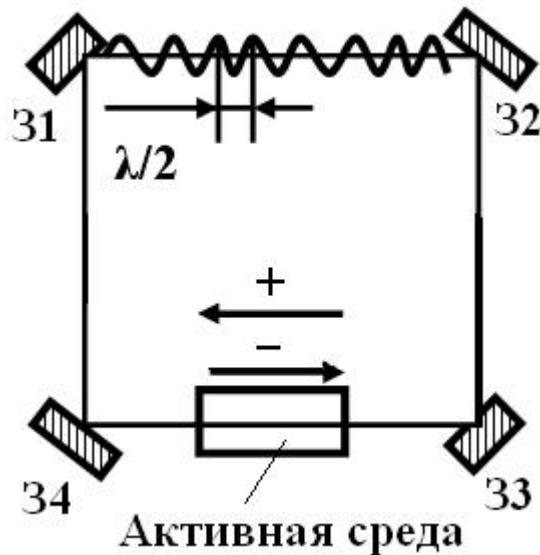


Рис. 1.2. Схема кольцевого лазера, образованного четырьмя зеркалами 31, 32, 33, 34

Для автоматической настройки кольцевого лазера в резонанс в состав схемы его жизнеобеспечения входит *схема регулировки периметра СРП*.

В покоящемся лазере оптические пути  $L_+$  и  $L_-$  одинаковы и частоты встречных лучей  $\nu_+ = \nu_-$ . Ненулевая угловая скорость  $\Omega$  вращения резонатора приводит к неравенству оптических путей и соответственно к неравенству оптических частот, которые определяются в соответствии с отношением

$$\Delta\nu/\nu = \Delta L/L. \quad (8)$$

В оптическом диапазоне частот ( $10^{14}$  Гц) малое изменение длины оптического пути приводит к значительному изменению частоты. В результате [2, 3]

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

где  $S$  — площадь, охватываемая оптическим контуром,  $k$  — коэффициент пропорциональности.

В случае квадратного интерферометра со стороной квадрата  $a$  формула (9) примет вид:

$$\Delta\nu = \frac{a\Omega}{\lambda}.$$

Для кольцевого лазера, работающего на длине волны 0,632 мкм (He-Ne лазер), с квадратным резонатором со стороной  $a=4$  см разность частот  $\Delta\nu$  составляет примерно 3 Гц при скорости вращения  $10^\circ/\text{с}$ . Эту разность частот, которая составляет  $10^{-14}$  от оптической частоты, можно измерить путем гетеродинирования встречных волн.

Измерения угловой скорости можно интерпретировать следующим образом. Стоячая волна, образуемая в резонаторе суперпозицией встречных

волн, сохраняет свое положение относительно инерциальной системы отсчета независимо от углового перемещения резонатора. В таком случае при угловых перемещениях гироскопа связанный с ним наблюдатель с помощью двух фотоприемников и счетчиков зафиксирует узлы или пучности стоячей волны электромагнитного поля, число которых в единицу времени даст разностную частоту  $\Delta\nu$ . При таком рассмотрении можно условно провести аналогию между лазерным и механическим гироскопом. В механическом гироскопе используется инерция вращающейся массы, в лазерном гироскопе – инерция покоящейся стоячей волны электромагнитного поля.

## 1.2. Получение информации об угловой скорости вращения

Как уже отмечалось, информация о параметрах вращения получается измерением разности частот противоположно направленных волн, путем их гетеродинирования, которое заключается в пространственном совмещении волн и выделении частоты биений [2].

Для реализации гетеродинного метода используется оптический смеситель (рис. 1.3), выполненный в виде призмы, в котором встречные волны создают интерференционную картину. Интенсивности картины описываются следующим выражением

$$I = I_0(1 + \cos(2\pi\epsilon x / \lambda + \Delta\omega t + \varphi)),$$

где  $\Delta\omega = 2\pi\Delta\nu$  – угловая частота биений,  $\epsilon = 2n\theta$ ,  $n$  – показатель преломления призмы,  $\theta$  – отклонение угла при вершине от  $90^\circ$ ,  $\varphi$  – постоянный сдвиг фаз.

Расстояние между полосами интерференционной картины равно  $\lambda/\epsilon$ . Для получения интерференционной картины с заданным расстоянием между полосами (1-3 мм) угол при вершине призмы должен отличаться от прямого на угол  $\theta$ , составляющий порядка 10-20 ".

Выходная информация считывается парой фотоприемников ФП1 и ФП2, две фоточувствительные площадки которых выполнены в виде параллельных полосок, помещенных в плоскость интерференционной картины и смещенных относительно друг друга на четверть периода интерференционной картины.

В идеальном покоящемся ЛГ ( $\Omega = 0$ ) частоты встречных волн равны ( $\Delta\nu = 0$ ), и интерференционная картина неподвижна. При вращении лазера вокруг оси, перпендикулярной плоскости контура резонатора, называемой осью чувствительности, интерференционная картина перемещается со скоростью, пропорциональной  $\Delta\nu$ , в результате чего на выходах фотоприемников появляются синусоидальные сигналы, сдвинутые по фазе на четверть периода. Эти сигналы иногда называются сигналами  $SIN$  и  $COS$ . Направление вращения определяется направлением перемещения интерференционной картины.

Затем синусоидальные сигналы с помощью электронных схем преобразуются в последовательность импульсов, число которых затем подсчитывается реверсивным счетчиком Сч. На выходе счетчика образуется число  $N$ , которое оказывается пропорциональным величине  $\Delta\nu$  и, соответственно, угловой скоро-

сти  $\Omega$ . Знак числа  $N$  указывает направление вращения – по или против часовой стрелки. ЛГ, таким образом, имеет цифровой выход.

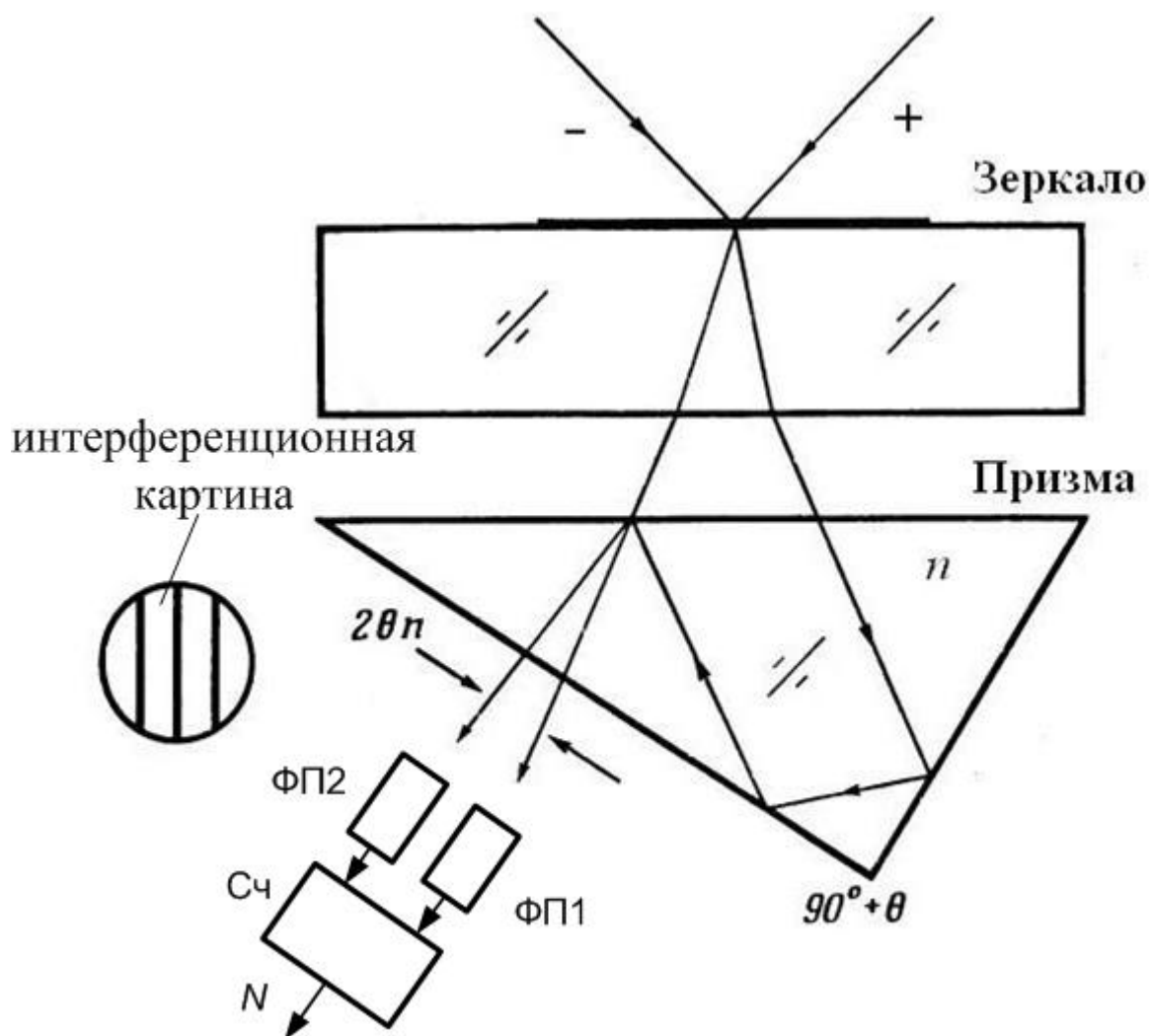


Рис. 1.3. Схема получения информации о параметрах вращения с лазерного гироскопа

ЛГ является интегрирующим устройством, измеряющим интегральный угол поворота резонатора лазера в инерциальном пространстве за время съема информации  $t$ :

$$N = \int_0^t \Delta \nu dt. \quad (10)$$

Обычно частота съема информации лежит в диапазоне 10-100 Гц.

### 1.3. Погрешности лазерного гироскопа

Выходной, или частотной, характеристикой ЛГ является зависимость вида

$$\Delta\nu = f(\Omega), \quad (11)$$

где  $\Delta\nu$  – измеренное значение разности частот встречных волн.

В идеальном случае это проходящая через ноль прямая. Однако в реальном случае ЛГ присущи погрешности, которые изменяют вид выходной характеристики (рис. 1.4).

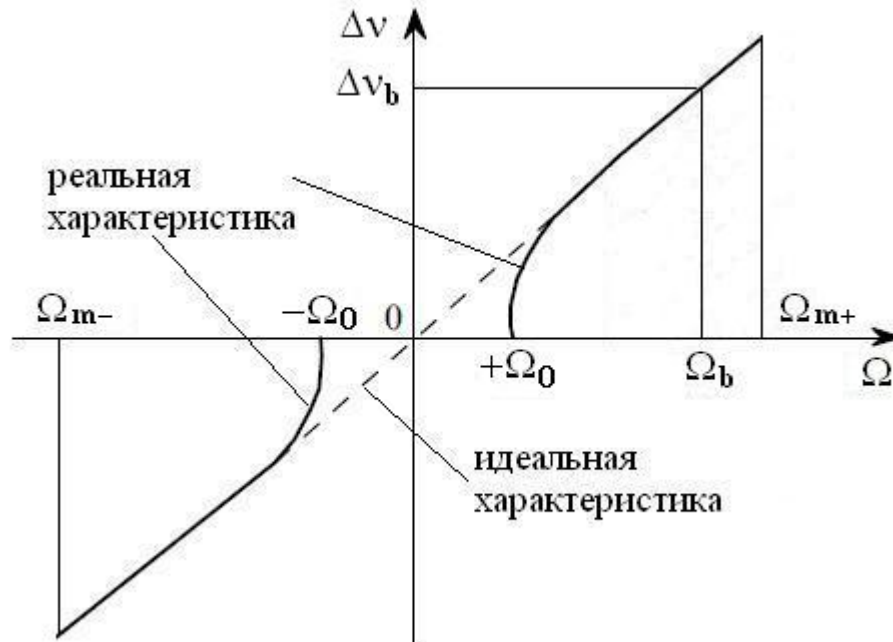


Рис. 1.4. Выходная характеристика лазерного гироскопа

Основными погрешностями ЛГ являются:

- сдвиг и нестабильность нуля выходной характеристики;
- нелинейность и нестабильность масштабного коэффициента;
- синхронизация частот встречных волн в резонаторе.

Синхронизация встречных волн, или захват, является наиболее серьезным недостатком ЛГ. Захват частот встречных волн проявляется в том, что при вращении ЛГ со скоростью, меньшей некоторого критического значения  $\Omega_0$  (порог захвата), частоты противоположно направленных волн синхронизируются и частота биений на выходе фотоприемника становится равной нулю, то есть гироскоп перестает чувствовать вращение. На выходной характеристике образуется зона нечувствительности к скорости вращения – «зона захвата» (рис. 1.4).

Рассмотрим происходящие при захвате физические процессы более подробно. Наличие очень слабой шероховатости поверхности зеркал кольцевого резонатора приводит к рассеянию части излучения (рис. 1.5). Как видно на рисунке, небольшая часть излучения  $r_2 E_2$  рассеивается в направлении распространения встречной волны  $E_1$ . Следствием рассеяния является то, что в резонаторе появляется слабая связь между встречными волнами.

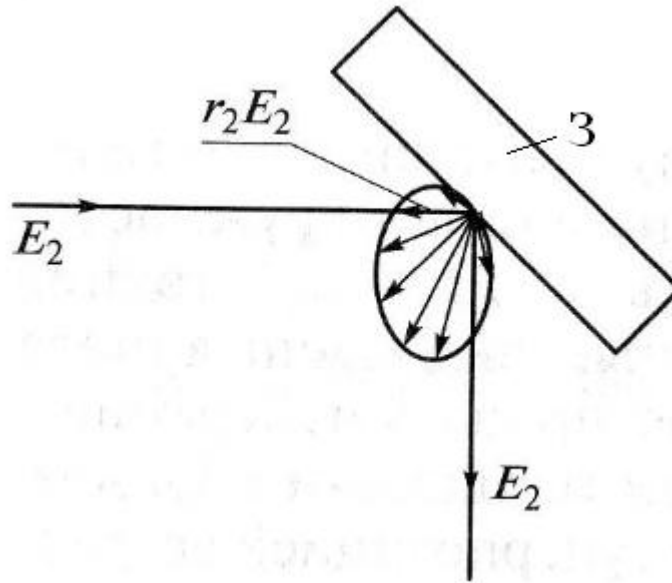


Рис. 1.5. Рассеяние световых волн

Представим встречные волны в виде фазовой диаграммы. Для этого электрические поля встречных волн записываются в виде

$$E(t) = E \cdot e^{j\varphi(t)}.$$

Средняя за период разность фаз полей встречных волн связана с разностью их частот как

$$\langle \varphi_2(t) - \varphi_1(t) \rangle_T = \Psi = \Omega \cdot t; \quad \frac{d\Psi}{dt} = \Omega. \quad (12)$$

Представим векторы электрических полей встречных волн в системе координат, связанной с одним из векторов, например  $E_1$  (рис. 1.6). При таком представлении вектор  $E_2$  вращается в выбранной системе координат со скоростью  $d\Psi/dt$ , а  $\Psi$  является мгновенным значением угла между векторами  $E_1$  и  $E_2$ . Рассеяние волны  $E_2$  в волну  $E_1$  с коэффициентом рассеяния  $r_2$  и фазовым углом рассеяния  $\varepsilon_2$  приводит к тому, что вектор  $E_1$  образуется сложением невозмущенного вектора  $E_1^0$  и вектора  $r_2 E_2$ , как это показано на рис. 1.6. За счет вращения вектора  $E_2$  вектор  $E_1$ , оказывается промодулированным по фазе и по амплитуде на частоте  $d\Psi/dt$ . Поскольку в кольцевых лазерах фазовые изменения приводят к изменениям частоты в соответствии с соотношением  $\frac{\alpha}{2\pi} = \frac{\delta\nu}{c/L}$ , где  $\alpha$  – угол между направлениями векторов  $E_1^0$  и  $E_1$ , то можно считать, что рассеяние волны  $E_2$  ведет к изменению частоты волны  $E_1$   $\delta\nu_1 = \frac{\alpha}{2\pi} \frac{c}{L}$ .

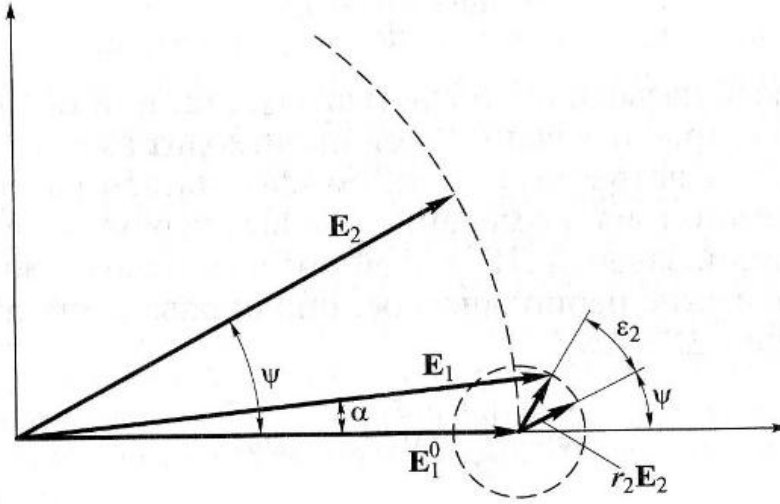


Рис. 1.6. Векторно-фазовая диаграмма затыгивания частот при наличии обратного рассеяния

По диаграмме (рис. 1.6) можно определить

$$\sin \alpha = \frac{r_2 E_2}{E_1} \sin(\Psi + \varepsilon_2).$$

Подставляя это выражение в предыдущее и считая, что  $\sin \alpha \approx \alpha$ , получим измерение частоты за счет рассеяния

$$\delta \nu_1 = \frac{c r_2}{2\pi L} \frac{E_2}{E_1} \sin(\Psi + \varepsilon_2).$$

Следовательно, вместо уравнения (12) нужно записать

$$\frac{d\Psi}{dt} = \Omega - \Omega_0 \cdot \sin(\Psi + \varepsilon_2), \quad (13)$$

где  $\Omega_0 = r_2 \frac{c E_2}{L E_1}$  – частота захвата (см. рис. 1.4).

В наиболее простом случае, когда  $r_1 = r_2$ ,  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \pi$ ,  $E_1 = E_2$ , получим выражение

$$\omega_0 = \frac{cr}{L}. \quad (14)$$

Уравнение (13) имеет два решения. Одно решение справедливо при выполнении неравенства  $\Omega < \Omega_0$ , что дает равенство разности встречных волн нулю

$$\Delta\omega = \frac{d\Psi}{dt} = 0.$$

Эта область называется областью захвата, или областью синхронизации встречных волн. В ней происходит взаимная синхронизация частот встречных волн, обусловленная рассеянием на элементах резонатора. Измерение угловых перемещений, являющееся основной задачей ЛГ, в этой области невозможно.

Второе решение периодическое, оно справедливо при выполнении условия  $\Omega > \Omega_0$ :

$$\Delta\omega = \frac{d\Psi}{dt} = \sqrt{\Omega^2 - \Omega_0^2} \quad (15)$$

Выражение (15) отражает реальную характеристику ЛГ. В ней имеется зона захвата (рис. 1.4), простирающаяся от  $-\Omega_0$  до  $+\Omega_0$  и имеющая ширину  $2\Omega_0$ . Рядом с зоной захвата характеристика нелинейна и имеет гиперболический вид.

При интегральном рассеянии от всех четырех зеркал для лазера с периметром  $L = 16$  см получим  $\Delta\nu_0 = (0,5...1,7) \cdot 10^3$  Гц, что более чем на два порядка превышает расщепление частот встречных волн, вызванное вращением Земли (4,6 Гц). Отметим, что возможности уменьшения зоны захвата чисто технологическими приемами в настоящее время практически исчерпаны, в связи с чем необходимо искать другие пути устранения ее влияния.

В настоящее время, чаще всего для уменьшения влияния связи встречных волн на работу ЛГ, используется *метод знакопеременного начального смещения*, или так называемый *метод частотной подставки*. Идея метода состоит в том, что при смещении рабочей точки выходной характеристики КЛ по периодическому закону лазер большую часть времени находится вне зоны захвата и чувствует в это время входную скорость вращения (рис. 1.7). И лишь малую часть периода изменения начального смещения КЛ находится в зоне захвата. При этом очевидно, что чем больше амплитуда изменения смещения и чем быстрее КЛ проходит через зону захвата, тем меньше влияние зоны захвата на ЛГ. Оптимальной с этой точки зрения является прямоугольная форма закона изменения начального смещения, так как в данном случае время нахождения в зоне захвата равно нулю.

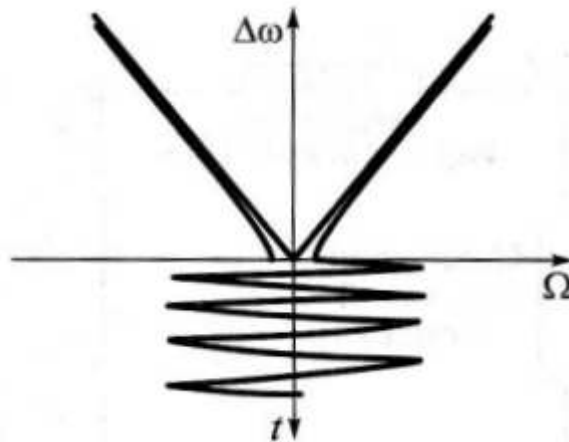


Рис. 1.7. Знакопеременное смещение в лазерном гироскопе (частотная подставка)

Знакопеременное начальное смещение реализуется обычно с помощью механических крутильных колебаний КЛ. В этом случае КЛ устанавливается на специальную конструкцию, совершающую вынужденные колебания (с помощью электромагнита или пьезокерамических преобразователей) на собственной резонансной частоте.

Метод частотной подставки в зеемановских кольцевых лазерах вследствие их магнитной чувствительности реализуется путем создания переменного магнитного поля.

### 1.4. Эффект Зеемана и знакопеременная оптическая подставка

Для вывода рабочей точки ЛГ на линейный участок (рис. 1.4) весьма привлекательным является использование эффекта Зеемана [4]. Такое использование оказывается возможным в кольцевых резонаторах с неплоским контуром [3] и, как следствие этого, с круговыми поляризациями генерируемых волн.

Сущность эффекта Зеемана состоит в том, что при наложении постоянного продольного магнитного поля доплеровский контур усиления активной среды расщепляется на два, симметрично сдвинутых относительно центра исходного нерасщепленного контура (рис. 1.8).

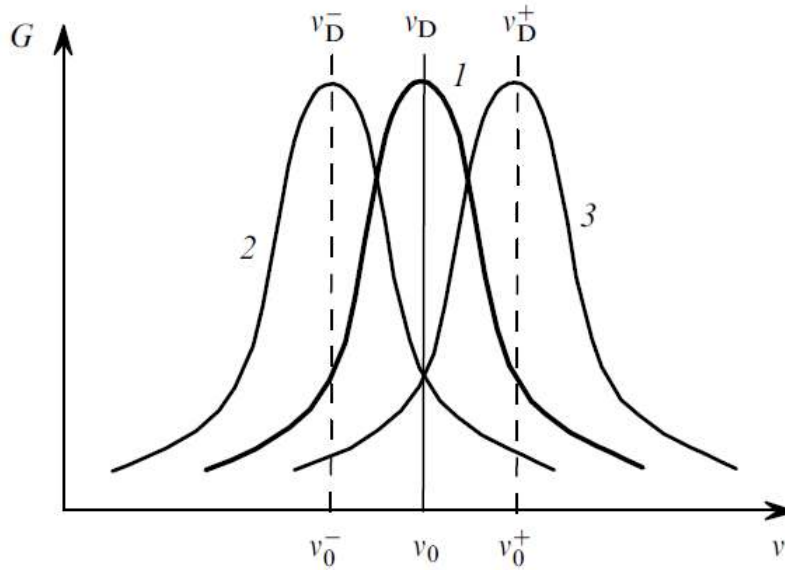


Рис. 1.8. Контур усиления активной газовой смеси в отсутствие магнитного поля (1), низкочастотный (2) и высокочастотный (3) контуры, возникающие при наложении продольного магнитного поля

Сдвиг определяется следующей формулой [4]

$$\Delta\nu_D^{\pm} = \pm \frac{g\beta H}{h} \ll \Delta\nu_D,$$

где  $g$  — фактор расщепления;  $\beta$  — магнетон Бора;  $H$  — напряженность магнитного поля,  $h$  — постоянная Планка;  $\Delta\nu_D$  — ширина нерасщепленного контура. При этом более высокочастотный контур с центральной частотой  $\Delta\nu_D^+ = \nu_0 + g\beta H/h$  усиливает волну только с правой круговой поляризацией, а более низкочастотный контур  $\Delta\nu_D^- = \nu_0 - g\beta H/h$  — только с левой.

Если же смотреть вдоль волновых векторов волн, то усиливаться будет пара волн с одинаковой круговой поляризацией, например, только левой или правой, в зависимости от того, какая пара волн попала в исходный нерасщепленный контур усиления. Так, если в двухчастотном ЛГ на центр нерасщепленной линии усиления была настроена частота резонаторных мод встречных волн с правой круговой поляризацией, а вектор  $H$  направлен вдоль канала контура по часовой стрелке, то распространяющаяся по часовой стрелке волна «+» будет

усиливаться расщепленным контуром с частотой  $\Delta v_D^+$ , а волна «—», распространяющаяся против часовой стрелке, — с частотой  $\Delta v_D^-$ .

Если первоначальная настройка частоты резонаторных «+» и «—» мод на максимум нерасщепленного контура усиления (при  $H = 0$ ) была произведена, например, для пары встречных волн с правой круговой поляризацией, то при наложении поля «+» мода сдвинется по направлению к центру высокочастотного контура ( $v_D^+$ ), а «—» мода — к центру низкочастотного ( $v_D^-$ ). Расщепление резонаторных мод определяется формулой

$$\Delta v_b = 2\delta v_D \frac{\Delta v_r}{\Delta v_D} \frac{G_0}{k} \ll \Delta v_D^\pm, \quad (16)$$

где  $\delta v_D = 2\Delta v_D^\pm = 2g\beta H/\hbar$  — полное расщепление контуров усиления,  $\Delta v_r$  — ширина резонаторной моды,  $G_0$  — коэффициент усиления в максимуме контура усиления,  $k$  — коэффициент потерь.

Таким образом, в покоящемся ЛГ вследствие наложения продольного магнитного поля возникнет разность частот генерации встречных волн, играющая роль «частотной подставки», выводящей рабочую точку на линейный участок частотной характеристики ЛГ.

Полагая  $\Delta v_D = 1500$  МГц,  $\Delta v_r = 1$  МГц,  $G_0/k \approx 2 G_0/k \sim 2$ ,  $H = 20$  Э, получаем  $\delta v_D \approx 72$  МГц;  $\Delta v_b = 192$  кГц  $\ll \Delta v_D$ . Поскольку, как указывалось ранее, полоса захвата  $\Delta v_0 = (0.5...1.7) \cdot 10^3$  Гц, то условие  $\Delta v_0 \gg \Delta v_b$  выполняется с большим запасом, что обеспечивает высокую линейность участка частотной характеристики ЛГ вблизи новой рабочей точки  $\Delta v_b$  (рис. 1.4), которую можно теперь принять за нулевую точку отсчета.

На базе эффекта Зеемана была предложена знакопеременная магнитооптическая подставка, сводящаяся к знакопеременной периодической модуляции параметров активной среды кольцевого лазера переменным магнитным полем. Такая параметрическая модуляция, как нетрудно видеть из рис. 1.7, приводит к тому, что высокочастотный и низкочастотный контуры усиления периодически меняются местами, вызывая тем самым периодическое изменение знака частотной подставки  $\Delta v_b$ . Частота модуляции  $f_b$  обычно лежит в диапазоне 200-1000 Гц.

Надлежащей обработкой выходного сигнала, промодулированного частотой  $f_b$ , можно исключить (вычесть) его знакопеременную часть, оставив лишь сигнал, обусловленный полезным невзаимным эффектом (т.е. вращением). Это вычитание осуществляется за один период модуляции, то есть за время 15 мс, и стабильность частоты подставки должна быть обеспечена именно за это время, что технически относительно несложно, в то время как для ЛГ с постоянным магнитным смещением такая стабильность должна быть обеспечена в течение всего времени его работы.

В составе системы жизнеобеспечения ЛГ имеется блок частотной подставки (БЧП), который генерирует переменный ток с частотой  $f_b$ , пропускаемый через создающие магнитное поле катушки индуктивности, установленные в лазерном резонаторе.

### 1.5. Экспериментальное измерение выходной характеристики

При экспериментальном измерении выходной характеристики ЛГ устанавливается в линейно изменяющееся магнитное поле. Магнитное поле создается при помощи катушек индуктивности, через которые пропускается ток развертки  $I_p$ , изменяющийся по треугольному закону. Как было указано в предыдущем разделе (см. формулу (16)), это создает сдвиг частот встречных волн, эквивалентный вращению ЛГ, и здесь вращение будет происходить с растущими скоростями сначала от  $\Omega_{m-}$  до  $\Omega_{m+}$ , а потом, наоборот, с убывающими скоростями от  $\Omega_{m+}$  до  $\Omega_{m-}$  (рис. 1.4). Такое сканирование по угловым скоростям продолжается периодически и сопровождается одновременным съемом числовых значений  $N_j$  с выхода реверсивного счетчика (рис. 1.3) и соответствующего значения тока развертки  $I_{pj}$ , где  $j$  – номер такта. Зная фиксированное время счета  $\Delta t$  за один такт съема информации, можно определить измеренную частоту

$$\Delta v_j = \frac{N_j}{\Delta t}. \quad (17)$$

На периферийных участках выходную характеристику можно считать близкой к идеальной (рис. 1.4). Следовательно,  $\Delta v_j = \Omega_j$ , и можно указать предельные значения тока развертки  $I_{pm-}$  и  $I_{pm+}$ , которые соответствуют значениям  $\Omega_{m-}$  и  $+\Omega_{m-}$ . Тогда коэффициент передачи по току будет равен

$$M = \frac{\Delta v_{m+} - \Delta v_{m-}}{I_{pm+} - I_{pm-}}. \quad (18)$$

Таким образом, точки  $j$  выходной характеристики ЛГ находятся следующим образом:

- значения  $N_j$  и  $I_{pj}$  измеряются в ходе эксперимента и запоминаются;
- значения  $\Delta v_j$  рассчитываются по формуле (17);
- коэффициент передачи по току  $M$  находится по формуле (18);
- значения  $\Omega_j$  рассчитываются по формуле  $\Omega_j = M \cdot I_{pj}$ .

Напомним, что при включенной частотной подставке выходная характеристика ЛГ близка к идеальной прямой линии, проходящей под углом  $45^\circ$  (рис. 1.4). При выключенном БЧП выходная характеристика ЛГ может сильно отличаться от идеальной наличием зоны статического захвата и нелинейностями (см. формулу (15)).

### 1.6. Экспериментальное определение масштабного коэффициента

В рассматриваемой лабораторной работе масштабный коэффициент ЛГ определяется в режиме измерения угла поворота. При линейной функции (9) масштабный коэффициент  $K$  равен

$$K = \frac{l \cdot \Delta v}{|N|},$$

где  $l$  – коэффициент, необходимый для перевода в угловые секунды,  $\Delta v$  – угол поворота ЛГ,  $N$  – модуль суммы импульсов, подсчитанных при повороте на заданный угол. Размерность масштабного коэффициента – угловая секунда, деленная на количество импульсов  $[''/имп]$ .

Для повышения точности измерения проводят несколько раз с усреднением результата

$$K = \frac{2m \cdot l \cdot \Delta v}{\sum_{i=1}^m |N_i^+ - N_i^-|}, \quad (19)$$

где  $2m$  – количество измерений,  $N_i^+$  – сумма импульсов, подсчитанная при повороте на заданный угол по часовой стрелке,  $N_i^-$  – сумма импульсов, полученная при повороте на заданный угол против часовой стрелки.

Используемые при выполнении задания 2 значения составляют следующие величины:  $\Delta v = 90^\circ$ ,  $l = 3600$ ,  $m = 3$ .

### 1.7. Экспериментальное определение скорости вращения Земли, географической широты и азимута

ЛГ чувствителен к скорости вращения Земли. Если ЛГ установить на Северном полюсе и подсчитать за какое-либо время число импульсов, то оно будет пропорционально углу поворота нашей планеты, то есть определится временем измерения и полной скоростью вращения Земли, составляющей  $\Omega_z = 15,04^\circ/\text{ч}$  (либо  $''/\text{мин}$ , либо  $''/\text{с}$ ). Если тот же эксперимент повторить на экваторе, то число импульсов будет равно нулю, поскольку проекция скорости вращения Земли на измерительную ось гироскопа будет равна нулю. Если же измерительная ось ЛГ ориентирована горизонтально, то подсчитанное число импульсов будет зависеть от ориентации прибора, то есть от угла между данным направлением и направлением на Север, называемого *азимутом*.

Эти факты обеспечивают возможность построения на базе ЛГ компаса – лазерного гирокомпа [2]. С его помощью можно определять проекции скорости вращения Земли на оси системы координат, привязанной к корпусу прибора, географическую широту и азимут места установки.

Рассмотрим экспериментальную методику, используемую при выполнении задания 3.

Введем пять ориентаций измерительной оси ЛГ (рис. 1.9). При ориентации 1 измерительная ось направлена вверх, при ориентациях 2 – 5 – горизонтально. Направление 2, азимут которого определяется в работе, задано на стенде, и относительно его определяются положения 3 – 5.

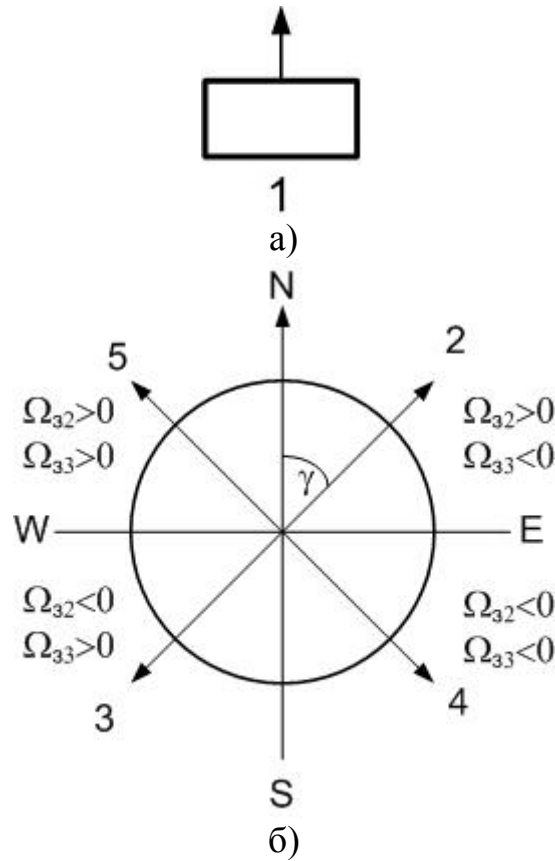


Рис. 1.9. Положения лазерного гироскопа при выполнении задания 3:

- а) – вертикальное направление измерительной оси;  
 б) – горизонтальные направления измерительной оси

Как видно из рисунка, направления 1,2,4 образуют систему координат, привязанную к корпусу ЛГ. Направления 3 и 5 соответственно противоположны направлениям 2 и 4 и служат для внесения поправки, необходимость которой вызвана дрейфом нуля ЛГ при измерении скорости вращения Земли.

При проведении эксперимента ЛГ последовательно ставится в положения 1, 2, 3, 4, 5, и в каждом из положений в течение времени  $t$  подсчитываются импульсы. В результате получаются числа  $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5$ . Дрейф нуля рассчитывается после проведения эксперимента следующим образом

$$\Delta\Omega = \frac{K(N_2 + N_3 + N_4 + N_5)}{4t}, \quad (20)$$

где  $K$  – масштабный коэффициент, определенный при выполнении задания 2. Проекции скорости вращения Земли на оси системы координат гироскопа с учетом поправки на дрейф находятся по формулам

$$\Omega_{31} = \frac{K \cdot N_1 - \Delta\Omega \cdot t}{t}, \quad (21)$$

$$\Omega_{32} = \frac{K \cdot N_2 - \Delta\Omega \cdot t}{t}, \quad (22)$$

$$\Omega_{33} = \frac{K \cdot N_4 - \Delta\Omega \cdot t}{t}. \quad (23)$$

Для расчета географической широты используется формула

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{\Omega_{31}}{\Omega_3}\right), \quad (24)$$

где полная скорость Земли  $\Omega_3 = 15,04$  °/ч.

Затем вычисляется синус и косинус угла азимута  $\gamma$  по следующим формулам

$$\cos \gamma = \frac{\Omega_{32}}{15,04 \cdot \cos \varphi}, \quad (25)$$

$$\sin \gamma = \frac{\Omega_{33}}{15,04 \cdot \cos \varphi}. \quad (26)$$

По знакам проекций скоростей вращения Земли можно в соответствии с рис. 1.9 б) определить сектор, в которой находится азимут. Обратная тригонометрическая функция вычисляется по меньшему из значений, найденных по формулам (25) и (26). В результате алгоритм окончательного определения азимута, измеряемого в радианах, выглядит следующим образом:

Если  $\Omega_{32} > 0$  и  $\Omega_{33} < 0$ , то если  $|\sin \gamma| < \cos \gamma$ , то  $\gamma = \arcsin |\sin \gamma|$ , в противном случае  $\gamma = \arccos \gamma$ .

Если  $\Omega_{32} < 0$  и  $\Omega_{33} < 0$ , то если  $|\sin \gamma| < |\cos \gamma|$ , то  $\gamma = \pi - \arcsin |\sin \gamma|$ , в противном случае  $\gamma = \pi - \arccos |\cos \gamma|$ .

Если  $\Omega_{32} < 0$  и  $\Omega_{33} > 0$ , то если  $\sin \gamma < |\cos \gamma|$ , то  $\gamma = \pi + \arcsin \gamma$ , в противном случае  $\gamma = \pi + \arccos |\cos \gamma|$ .

Если  $\Omega_{32} > 0$  и  $\Omega_{33} > 0$ , то если  $\sin \gamma < \cos \gamma$ , то  $\gamma = 2\pi - \arcsin \gamma$ , в противном случае  $\gamma = 2\pi - \arccos \gamma$ .

## **2. Структурная схема лабораторной установки**

Схема лабораторной установки представлена на рис. 2.1. Она представляет собой типичное виртуальное средство измерений [1].

В состав лабораторной установки входят лазерный гироскоп ЛГ, установленный на поворотном столике ПС, измерительный блок ИБ, персональный компьютер ПК. ЛГ подключен к ИБ, который содержит все необходимые схемы жизнеобеспечения. В ИБ поступают измерительные сигналы от ЛГ.

ИБ имеет только один расположенной на передней панели орган управления – выключатель питания. Все остальные операции осуществляются с помощью ПК, при этом все необходимое взаимодействие производится по последовательному интерфейсу RS-232. На ПК установлено программное обеспечение ПО, благодаря которому осуществляется управление ИБ и ЛГ, сбор, обработка и отображение измерительной информации.

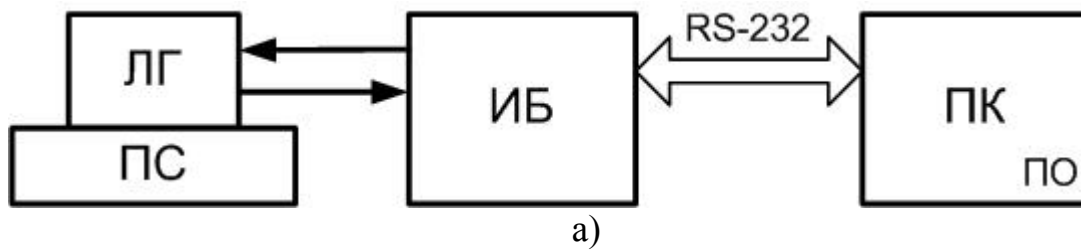


Рис. 2.1. Лабораторная установка:

- а) – структурная схема;
- б) – внешний вид

ПС имеет ручное управление. Он позволяет ориентировать гироскоп в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также осуществлять в горизонтальной плоскости повороты на углы, кратные  $90^\circ$ .

Столик имеет четыре фиксатора, расположенные через  $90^\circ$ .

### **3. Подготовка к работе**

1. По теоретической части данных методических указаний и литературе [2, 3], необходимо изучить следующие вопросы:
  - устройство и принцип работы лазерного гироскопа;
  - особенности получения информации от лазерного гироскопа;
  - погрешности и реальная выходная характеристика лазерного гироскопа;
  - эффект Зеемана и его использование;
  - методика экспериментального определения масштабного коэффициента;
  - методика экспериментального определения скорости вращения Земли, географической широты и азимута.

2. Ознакомьтесь со структурной схемой лабораторной установки (рис. 2.1a).
3. Прочтите и продумайте порядок выполнения заданий лабораторной работы.

#### **4. Порядок выполнения работы**

**Перед выполнением лабораторной работы** включите лабораторную установку и дайте ей прогреться в течение 30 мин. Для этого выполните следующие действия.

1. Включите персональный компьютер и измерительный блок. Установите ЛГ так, чтобы его измерительная ось была направлена вертикально вверх (положение 1 на рис. 1.9a).

2. После загрузки операционной системы найдите на рабочем столе ярлык приложения LW2\_1.exe. Запустите это приложение, после чего откроется страница лицевой панели, показанная на рис. 4.1.

3. Нажмите кнопку *Выполнить*, после чего откроется страница лицевой панели, показанная на рис. 4.2.

4. Включите ЛГ, нажав на кнопку *Включить*. Убедитесь по наличию свечения, что кольцевой лазер зажегся. Подождите 10 секунд для того, чтобы закончился процесс установки рабочего режима.

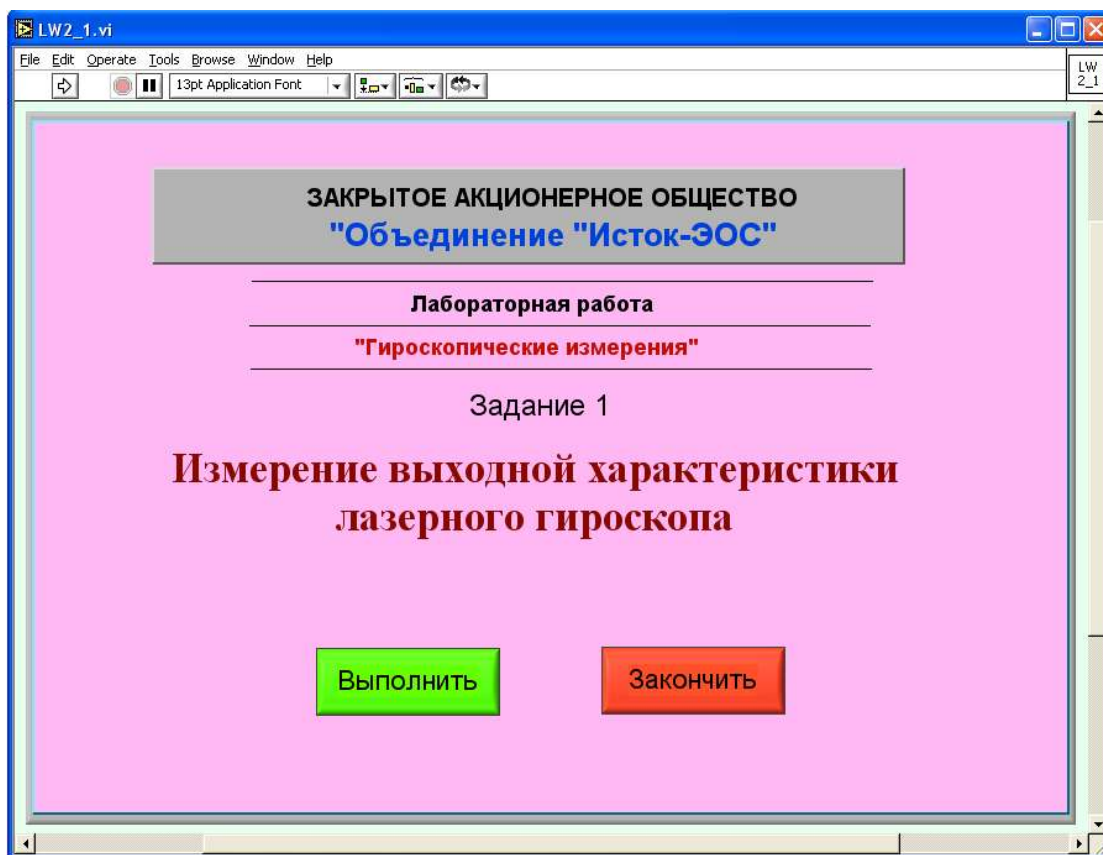


Рис. 4.1. Начальная страница лицевой панели приложения LW2\_1.exe

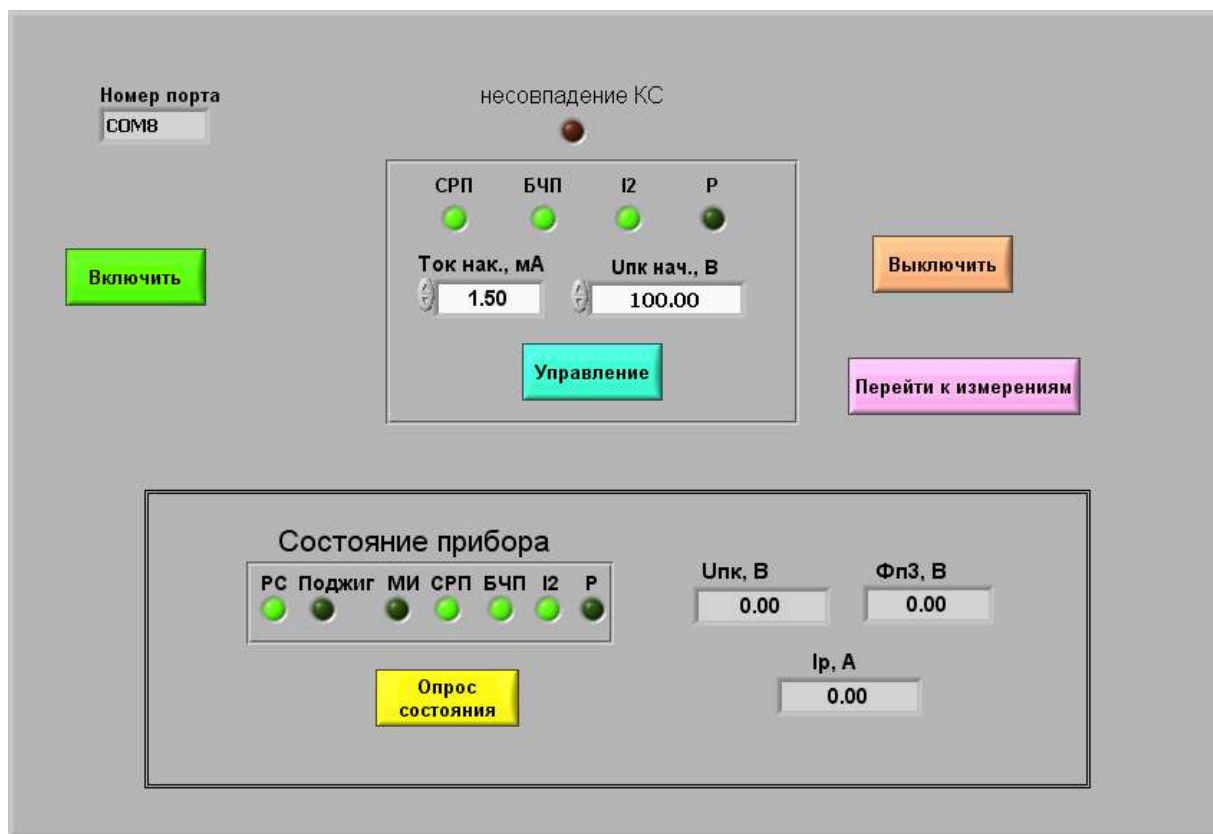


Рис. 4.2. Страница лицевой панели, предназначенная для управления режимами работы лазерного гироскопа

5. Установите управляющие элементы СРП, БЧП, I2 в активное состояние, в котором они светятся зеленым светом. Нажмите кнопку *Управление*. Команда включения схемы регулирования периметра СРП, блока частотной подставки БЧП и двух промежутков горения I2 будет передана в ЛГ.

Примечание. Безошибочному обмену данными соответствует погашенное состояние индикатора *Несовпадение КС*. При наличии ошибок индикатор горит красным светом. В этом случае обратитесь к лаборанту или преподавателю.

5. Удостоверьтесь, что ЛГ находится в нужном режиме. Для этого нажмите кнопку *Опрос состояния*, после чего должны загореться зеленым светом индикаторы состояния РС, СРП, БЧП, I2. Если это не так, обратитесь к лаборанту или преподавателю.

6. Подождите 30 мин., чтобы лабораторная установка прогрелась

7. Нажмите кнопку *Перейти к измерениям* и приступите к выполнению задания 1.

### **Задание 1. Измерение выходной характеристики лазерного гироскопа**

1. Включите режим работы Р, в котором производится сканирование по частоте  $\Omega$  путем линейного изменения магнитного поля (см. раздел 1.5).

Для включения режима Р установите управляющие элементы СРП, БЧП, I2, Р (рис. 4.2) в активное состояние, в котором они светятся зеленым светом.

Нажмите кнопку *Управление*. Команда включения режимов работы будет передана в ЛГ.

Убедитесь, что режим Р установлен. Для этого нажмите кнопку *Опрос состояния*, после чего должны загореться зеленым светом индикаторы состояния РС, СРП, БЧП, I2, Р. Если это не так, обратитесь к лаборанту или преподавателю.

2. Произведите сбор данных, необходимый для построения выходной характеристики ЛГ, работающего в штатном режиме.

Нажмите на кнопку *Перейти к измерениям* (рис. 4.2). После перехода на другую экранную страницу (рис. 4.3) нажмите на кнопку *Включить синхр. режим*. После подачи команды в программу будут поступать данные, в состав которых входят подсчитанное за один такт передачи число импульсов  $N$ , текущее значение тока развертки  $I_p$ , напряжение на пьезокерамике  $U_{пк}$ , напряжение на фотоприемнике ФпЗ. Одновременно на графическом экране будет строиться зависимость измеренной частоты  $\Delta\nu$  от времени.

Примечание. Ток  $I_p$  пропускается через катушку индуктивности, создающую изменяющееся магнитное поле развертки. Напряжения  $U_{пк}$  и ФпЗ необходимы для работы схемы регулирования периметра СРП, автоматически настраивающей лазерный резонатор на одну из мод генерации.

3. Наблюдайте за графическим экраном и за индикатором *Несовпадение КС*. Данный индикатор при отсутствии ошибок сбора данных должен быть в погашенном состоянии.

Дождитесь, когда на графическом экране будет отображено 1,5-2 периода треугольного сигнала и нажмите кнопку *Выключить синхр. режим*. Убедитесь, что поступление данных в программу прекратилось.

Выделите парами курсоров (рис. 4.3) три последовательно расположенных линейных участка полученных данных. На начало первого участка должен быть установлен желтый курсор, на его конец – зеленый курсор, на начало второго участка – красный курсор, на его конец – синий курсор, на начало третьего участка – белый курсор, на его конец – оранжевый курсор.

Примечание. Если изменить последовательность расположения курсоров, выходная характеристика ЛГ будет построена неправильно.

Нажмите кнопку *Перейти к построению характеристики*.

4. На открывшейся экранной странице нажмите кнопку *Построить* (рис. 4.4), после чего она будет построена на имеющемся графическом экране.

5. Изучите построенную характеристику. Убедитесь, что в штатном режиме работы ЛГ выходная характеристика близка к идеальной, и статическая зона захвата на ней отсутствует (рис. 1.4).

При изучении используйте курсоры, перемещаемые с помощью мыши. Если курсоры находятся вне экрана, нажмите кнопку *Найти курсоры*.

6. Сохраните измеренную выходную характеристику в файл текстового формата. Для этого нажмите кнопку *Записать файл*.

7. Для остановки приложения нажмите кнопку *СТОП*.

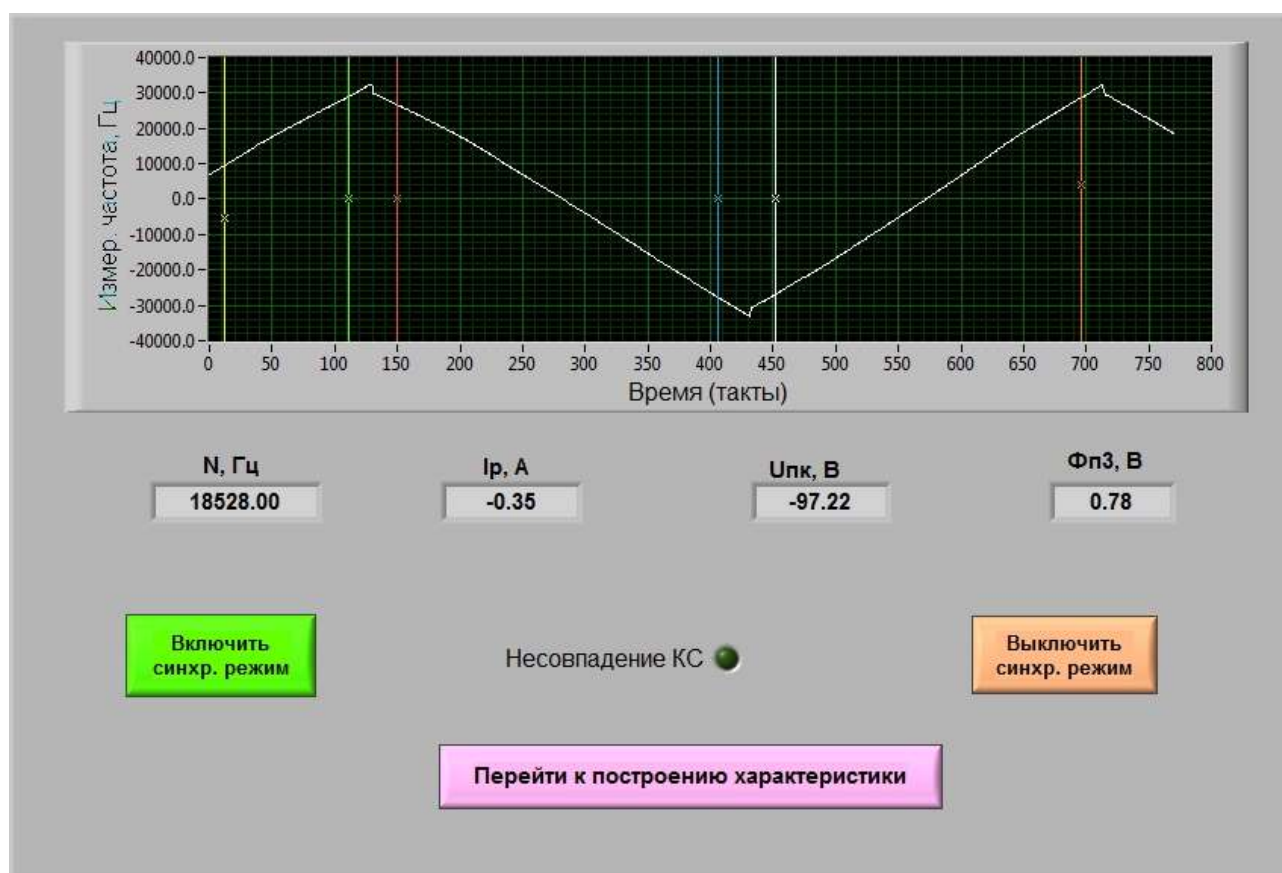


Рис. 4.3. Вид лицевой панели сбора данных, используемой при выполнении задания 1 «Измерение выходной характеристики лазерного гироскопа»

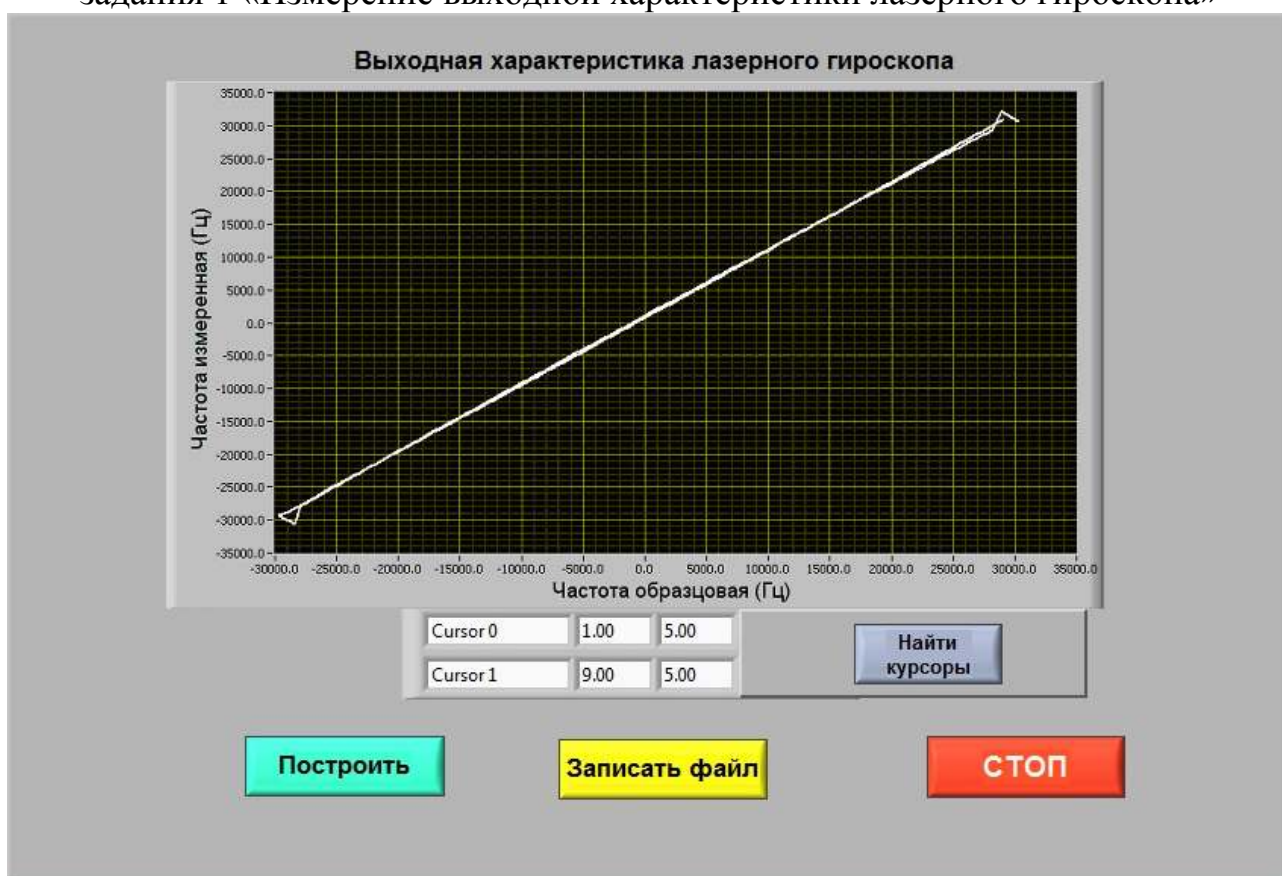


Рис. 4.4. Вид лицевой панели построения выходной характеристики при работе ЛГ в штатном режиме

8. Заново запустите приложение LW2\_1 и нажмите кнопку *Выполнить*.

Примечание. При открытом окне приложения его повторный запуск осуществляется путем нажатия на стрелку, находящуюся в левом верхнем углу окна (рис. 4.1). Остановленной программе соответствует стрелка белого цвета, работающей программе – стрелка черного цвета.

9. Отключите работу блока частотной подставки БЧП и схему регулирования периметра СРП, для чего сделайте следующие действия.

Перед отключением нажмите кнопку *Опрос состояния*. Убедитесь, что ЛГ включен и находится в штатном режиме, чему соответствуют горящие индикаторы состояния РС, СРП, БЧП, I2, Р.



Рис. 4.5. Вид лицевой панели построения выходной характеристики при работе ЛГ с выключенным блоком частотной подставки

Полученное значение  $Unk$ ,  $B$  скопируйте в управляющий элемент  $Unk$  нач.,  $B$  (рис. 4.2). Затем переведите в пассивное состояние управляющие элементы БЧП и СРП, а в активном состоянии оставьте только управляющие элементы I2, Р. Затем нажмите кнопку *Управление*, и соответствующая команда будет передана в измерительный блок.

Убедитесь, что БЧП и СРП отключены. Для этого нажмите кнопку *Опрос состояния*, после чего должны гореть зеленым светом только индикаторы состояния РС, I2, Р. Если это не так, обратитесь к лаборанту или преподавателю.

Примечание. Иногда при выполнении лабораторной работы бывает полезным проведение повторной инициализации измерительного блока. Для этого

кнопкой *Выключить* ЛГ выключается, а потом включается кнопкой *Включить* (рис. 4.2).

10. Повторите действия, описанные в пп. 2-7. Построенная характеристика (рис. 4.5) должна иметь зону захвата, которую следует измерить с помощью курсоров. Запишите полученные значения границ и ширины зоны захвата, после чего закройте приложение.

11. Перепишите оба файла с выходными характеристиками на свой носитель информации для последующего использования при составлении отчета.

## **Задание 2. Измерение масштабного коэффициента лазерного гироскопа**

1. Запустите приложение LW2\_2.exe. Нажмите кнопку *Выполнить*. Откроется страница лицевой панели, предназначенная для управления режимами работы ЛГ (рис. 4.2).

2. Убедитесь по наличию свечения, что ЛГ включен. Если он отключен, для включения используйте кнопку *Включить*. Перед выполнением следующих действий подождите 10 с.

3. Установите штатный режим работы ЛГ.

Для этого установите управляющие элементы СРП, БЧП, I2 в активное состояние, в котором они светятся зеленым светом. Нажмите кнопку *Управление*. Команда включения режимов работы будет передана в ЛГ.

Убедитесь, что режим штатный режим установлен. Для этого нажмите кнопку *Опрос состояния*, после чего должны загореться зеленым светом индикаторы состояния РС, СРП, БЧП, I2. Если это не так, обратитесь к лаборанту или преподавателю.

Нажмите на кнопку *Перейти к измерениям*, после чего должна открыться страница интерфейса пользователя, показанная на рис. 4.6.



Рис. 4.6. Вид лицевой панели при выполнении задания 2  
«Измерение масштабного коэффициента»

4. Произведите сбор данных при повороте на угол  $90^\circ$  по часовой стрелке, для чего произведите следующие действия.

Нажмите на кнопку *Включить синхр. режим* и убедитесь, что данные стали поступать и отображаться на графическом экране. В программу будут поступать данные, в состав которых входят подсчитанное за один такт передачи число импульсов  $N$ , текущее значение тока развертки  $I_p$ , напряжение на пьезо-керамике  $U_{пк}$ , напряжение на фотоприемнике ФПЗ. Одновременно на графическом экране будет строиться зависимость  $N$  от времени.

Медленно поворачивайте ПС по часовой стрелке от одного до следующего фиксированного положения. После окончания поворота и фиксации положения столика нажмите кнопку *Выключить синхр. режим* и убедитесь, что данные от измерительного блока перестали поступать.

Примечание. Быстрое вращение ЛГ может привести к переполнению счетчиков, которое возникает при превышении числа 32767.

Выделите на графическом экране курсорами участок, соответствующий повороту столика и нажмите кнопку *Рассчитать сумму*. Будет проведено суммирование всех импульсов, полученных во время поворота. Полученное значение отобразится на одиночном индикаторе и на индикаторе массива данных *Сумм. имп.*

5. Повторите п. 4 с той разницей, что поворот столика осуществляется против часовой стрелки.

6. Дважды повторите пп. 4 и 5.

При завершении сбора данных убедитесь, что индикатор массива данных *Сумма импульсов* отображает шесть экспериментально полученных сумм импульсов. Три из них получены при повороте по часовой стрелке и отрицательны, три других – при повороте против часовой стрелки и положительны.

7. Убедитесь, что на соответствующих элементах управления правильно указаны угол поворота и количество опытов. Они должны быть соответственно равны  $90^\circ$  и 6 опытам. Нажмите кнопку *Рассчитать коэффициент*, и программа произведет расчет по формуле (19).

После проведения расчета масштабный коэффициент отобразится на соответствующем индикаторе лицевой панели.

8. Остановите приложение кнопкой СТОП.

9. Запишите полученные значения сумм импульсов и масштабного коэффициента для дальнейшего использования при составлении отчета. После этого закройте приложение.

10. При неудачах в процессе сбора и обработки данных следует остановить программу кнопкой СТОП и повторить все действия эксперимента заново.

### **Задание 3. Определение скорости вращения Земли, географической широты и азимута**

1. Запустите приложение LW2\_3.exe. Нажмите кнопку *Выполнить*. Открывается страница лицевой панели, предназначенная для управления режимами работы ЛГ (рис. 4.2).

2. Убедитесь, что ЛГ включен. Если он отключен, для включения используйте кнопку *Включить*. Перед выполнением следующих действий подождите 10 с.

3. Установите штатный режим работы ЛГ.

Для этого установите управляющие элементы СРП, БЧП, I2 в активное состояние, в котором они светятся зеленым светом. Нажмите кнопку *Управление*. Команда включения режимов работы будет передана в ЛГ. Затем убедитесь, что режим штатный режим установлен. Для этого нажмите кнопку *Опрос состояния*, после чего должны загореться зеленым светом индикаторы состояния РС, СРП, БЧП, I2. Если это не так, обратитесь к лаборанту или преподавателю.

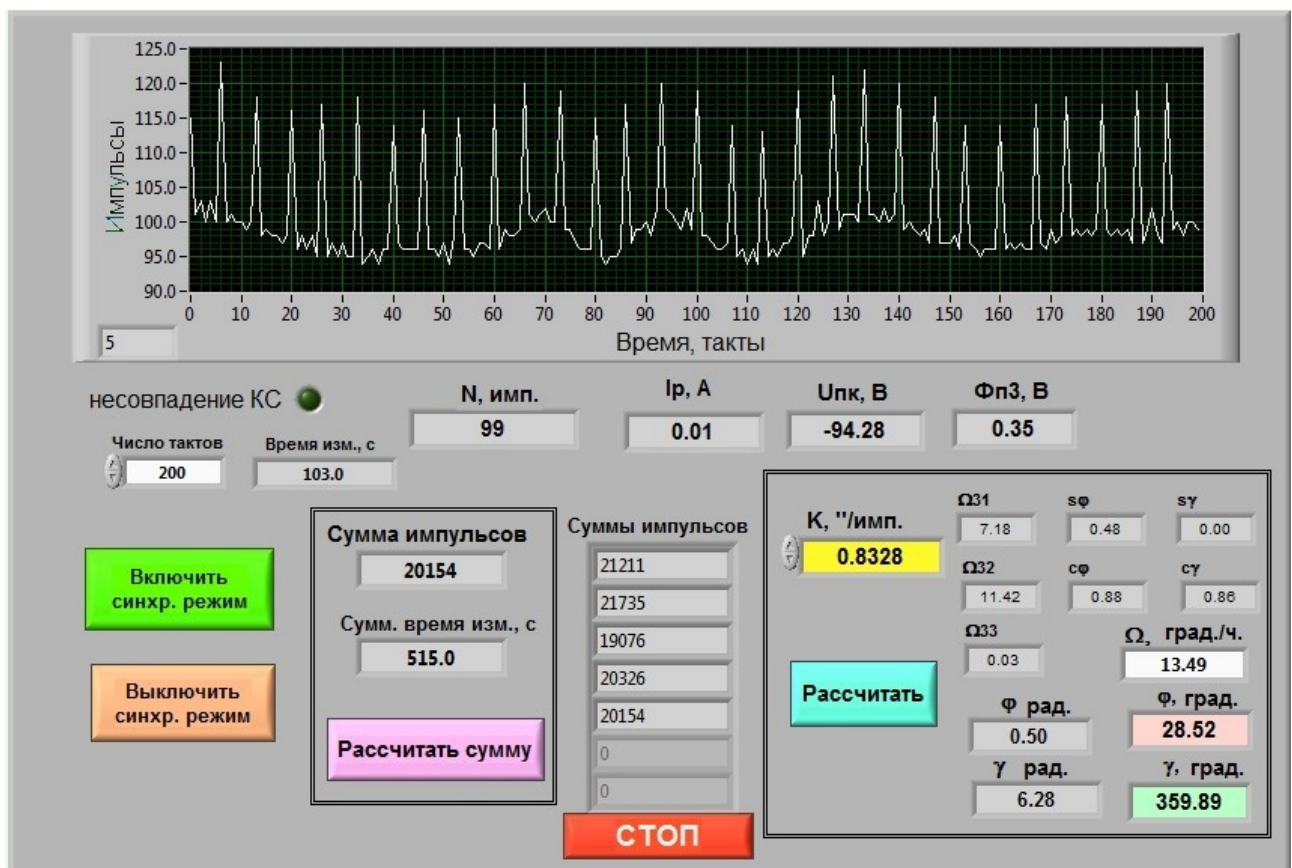


Рис. 4.7. Вид лицевой панели при выполнении задания 3 «Измерение скорости вращения Земли, географической широты и азимута»

4. Нажмите на кнопку *Перейти к измерениям*, после чего должна открыться страница интерфейса пользователя, показанная на рис. 4.7.

Установите время сбора данных  $t$ . Оно выражается в тактах передачи данных при длительности одного такта, равной 0,5 с. По умолчанию число тактов равно 500, что соответствует 250 секундам.

5. Установите ЛГ в положение 1 (см. рис. 1.9а), соответствующее ориентации измерительной оси ЛГ вертикально вверх. Нажмите на кнопку *Включить синхр. режим* (рис. 4.7) и убедитесь, что данные стали поступать и отображаться на графическом экране. В программу будут поступать данные, среди которых подсчитанное за один такт передачи число импульсов  $N$ , текущее значение тока развертки  $I_p$ , напряжение на пьезокерамике  $U_{пк}$ , напряжение на фотопри-

емнике ФпЗ. Одновременно на графическом экране будет строиться зависимость количества импульсов  $N$  от времени.

После завершения последнего такта сбор данных должен быть автоматически остановлен.

Примечание. Сигнал, отображаемый на графическом экране (рис. 4.7), имеет импульсный характер из-за особенностей реализации измерительного блока. Этот факт при выполнении лабораторной работы не является существенным.

6. Рассчитайте сумму импульсов, накопленных за время сбора данных. Для этого нажмите на кнопку *Рассчитать сумму*. Полученное значение отобразится на одиночном индикаторе и на индикаторе массива данных *Суммы импульсов*.

7. Ориентируйте измерительную ось ЛГ в соответствии с положениями 2, 3, 4, 5 и выполняйте пп. 5 и 6. В результате на индикаторе массива данных *Суммы импульсов* должно отобразиться пять экспериментально определенных значений сумм  $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5$  (см. раздел (1.7) данных методических указаний).

8. Запишите в элемент управления  $K, ''_{имп}$  значение масштабного коэффициента, определенного при выполнении задания 2. Нажмите на кнопку *Рассчитать*.

В результате расчета на соответствующие индикаторы выводятся проекции скорости вращения Земли  $\Omega_{31}, \Omega_{32}, \Omega_{33}$  на оси прибора, скорость вращения Земли  $\Omega$ , географическая широта  $\varphi$  и азимут  $\gamma$  места установки ЛГ, выраженные в радианах и градусах.

9. Для остановки приложения нажмите кнопку *СТОП*.

10. Запишите полученные значения сумм импульсов  $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5$  и рассчитанные значения (см. п. 8). После этого закройте приложение.

10. При неудачах в процессе сбора и обработки данных следует остановить программу кнопкой *СТОП* и повторить все действия эксперимента заново.

### **Отчет о выполнении лабораторной работы.**

Отчет о выполнении лабораторной работы выполняется в текстовом редакторе MS Word.

В состав отчета должны входить:

- название и цель лабораторной работы;
- краткое теоретическое введение;
- схема лабораторной установки;
- формулировки выполняемых заданий;
- построенные на основе сохраненных файлов выходные характеристики лазерного гироскопа в штатном режиме и в режиме с отключенной частотной подставкой с указанием ширины зоны захвата;
- экспериментальные данные и повторно выполненные расчеты масштабного коэффициента, проекций скоростей и скорости вращения Земли, географической широты и азимута;
- необходимые пояснения и выводы.

Для построения графиков рекомендуется использовать средства построения точечных диаграмм, имеющиеся в составе MS Excel.

#### **4. Контрольные вопросы**

1. Что такое лазерный гироскоп?
2. В чем состоит эффект Саньяка?
3. В чем отличие лазерного гироскопа и интерферометра Саньяка? Какие достоинства и недостатки у каждого из приборов?
4. Назовите основные виды погрешностей лазерных гироскопов.
5. Почему возникает статическая зона захвата?
6. Для чего служит частотная подставка?
7. Что такое масштабный коэффициент лазерного гироскопа?
8. Что такое гироскомпас?
9. Как с помощью лазерного гироскопа измерить направление на Север и широту точки стояния?

#### **Литература**

1. ГОСТ Р 8.818-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений и системы измерительные виртуальные. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2014.
2. Ароновиц Ф. Лазерный гироскоп. В кн.: Применения лазеров / пер. с англ. под ред. В.П. Тычинского. / в книге «Применение лазеров». М.: Мир, 1976. с. 181-269.
3. Панов М.Ф., Соломонов А.В., Филатов Ю.В. Физические основы интегральной оптики: Учебное пособие. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. 432 с.
4. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Дмитриев В.Г. Кольцевые газовые лазеры с магнитооптическим управлением в лазерной гироскопии / Квантовая электроника. 2000. №2(30). с. 96-104.

*Методические указания одобрены на заседании кафедры «Кибернетики» (протокол №8 от 04.09.2013 г.) и могут быть рекомендованы магистрам, обучающимся по магистерским программам «Лазерные интеллектуальные навигационные системы», «Системы управления и информации в инженерии»*

*Зав. кафедрой «Кибернетики»  
д.т.н., профессор*

*/В.Н.Афанасьев/*

## Учебное издание

Измерение характеристик лазерного гироскопа.

Составители: БЕССОНОВ Алексей Станиславович,  
КОЛБАС Юрий Юрьевич,  
СОЛОВЬЕВА Татьяна Ивановна

Редактор С.П. Клышинская  
Технический редактор О.Г.Завьялова

Подписано в печать 20.10.2014. Формат 60x84/16.

Бумага офсетная №2. Ризография. Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 1,8.

Изд. № 26. Тираж 50 экз. Заказ 259. Бесплатно.

Московский институт электроники и математики Национального  
исследовательского университета «Высшая школа экономики».

109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3/12.

Редакционно-издательский отдел Московского института электроники и  
математики Национального исследовательского университета «Высшая школа  
экономики». Участок МИЭМ типографии НИУ ВШЭ.

113054, Москва, ул. М. Пионерская, 12.