

**Национальный технический университет Украины
"Киевский Политехнический Институт"**

**Факультет авиационной и космической техники
кафедра систем управления летательными аппаратами**

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

**по курсу: "Чувствительные элементы гироскопических
систем"**

**по теме: "Исследование зависимости смещения нуля
вибрирующего ЛГ от его параметров"**

Выполнили:

студенты 4 курса, группа ВЛ-22

_____ **Лаврущенко Александр Николаевич**

_____ **Шевченко Владимир Юрьевич**

Принял:

_____ **Бондаренко Евгений Анатольевич**

Киев 2006

Содержание

I. Вступление

II. Обзор состояния лазерной гироскопии за рубежом

1. Принцип действия
2. Погрешности ЛГ
3. Устройство и характеристики зарубежных ЛГ
4. Применение ЛГ
5. Заключение

III. Анализ зависимости смещение нуля ЛГ, от его параметров

1. Математическая модель ЛГ
2. Исходные соотношения
3. Постановка задачи
4. Краткое описание методики расчета
5. Программная реализация в Octave
6. Моделирование
7. Выводы и рекомендации

IV. Заключение

Список использованной литературы

Приложение А. Код программы

Приложение Б. Плакат "Математическая модель"

Приложение В. Плакат "Графики $\Omega_0(p)$, $\Omega_0(A)$ "

Приложение Г. Плакат "Графики $\Omega_0(\nu)$, $\Omega_0(\Delta Q/Q)$, $\Omega_0(N_{rel})$ "

I. Вступление

Среди многочисленных областей применения лазеров гироскопия является одной из самых перспективных. Лазерные гироскопы (ЛГ) считаются наиболее подходящими датчиками для бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Находившиеся в течение долгого времени в стадии экспериментальных исследований ЛГ выходят из стен лабораторий и завоевывают место на коммерческом рынке. По мнению зарубежных специалистов, уже с 80-х гг. лазерным БИНС будет отдаваться предпочтение перед традиционными навигационными системами.

Чувствительным элементом ЛГ является лазер с кольцевым резонатором, в котором генерируются две независимые противоположно направленные бегущие волны. Частоты бегущих волн определяются скоростью вращения кольцевого резонатора в инерциальном пространстве. По разности частот встречных волн, которая пропорциональна угловой скорости, можно непосредственно определить параметры вращения. Это, пожалуй, единственный способ получения данных о скорости вращения, в котором не используется накопление энергии вращающейся или вибрирующей массой. Отсутствие такой массы является характерной особенностью ЛГ и в значительной мере обуславливает его преимущества, среди которых зарубежные специалисты выделяют:

- большой диапазон измеряемых угловых скоростей;
- дискретный характер информации;
- отсутствие перекрестных связей;
- нечувствительность к ускорениям и перегрузкам;
- высокую надежность и большой срок службы;
- малое время готовности;
- малую потребляемую мощность;
- низкую стоимость при высоких точностных характеристиках.

Принципиальная простота и перечисленные преимущества ЛГ привлекли

внимание не только исследователей, но и фирм-разработчиков навигационных систем. Одна из них - Sperry (США) , уже в 1962 г. продемонстрировала лабораторный образец ЛГ. Однако путь к достижению высоких точностных характеристик оказался более сложным, чем предполагалось. Потребовались длительные фундаментальные исследования для выяснения источников ошибок ЛГ и способов их устранения. К началу 70-х гг. наблюдается снижение интереса к ЛГ, сокращение субсидирования со стороны государственных ведомств и фирм - потенциальных потребителей. Некоторые фирмы, например французская Compagnie Generale D'Electricite (CGE), отказываются от дальнейших разработок. Отчасти это, конечно, объясняется тем, что конкуренция со стороны механических гироскопов оказалась очень высокой.

Тем не менее, две фирмы США, Sperry и Honeywell, сумели в середине 70-х гг. воплотить свои научно-технические решения в совершенных приборах и в значительной мере на собственные средства создать на их основе БИНС.

Чрезвычайно успешные испытания самолетной БИНС фирмы Honeywell в 1975 г. привели к перелому в отношении к ЛГ, сейчас уже можно назвать более 10 крупнейших зарубежных фирм, проводящих научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в области лазерной гироскопии. В их числе американские фирмы Rockwell International Co., Litton Industry, United Technologies" Hamilton Standard div., Raytheon Co., International Singer's Kearfott div., Lear Siegler, McDonnell Douglas, Martin Marietta, Texas Instruments, английские Marconi Avionics, Ferranti, французские SFENA, Sagem .

Дать некоторое представление о современном состоянии исследований и разработок в области лазерной гироскопии ведущих зарубежных фирм - цель настоящего обзора. В нем описаны физические принципы, положенные в основу устройства ЛГ ведущих зарубежных фирм, отмечены особенности их конструкции и технологии изготовления, приведены параметры разработанных моделей и рассмотрены наметившиеся области применения.

II. Обзор состояния лазерной гироскопии за рубежом

1. Принцип действия

Принцип действия ЛГ нетрудно понять, рассматривая вращение кольцевого резонатора относительно оси, перпендикулярной плоскости падения лучей на зеркала (рис. 1).

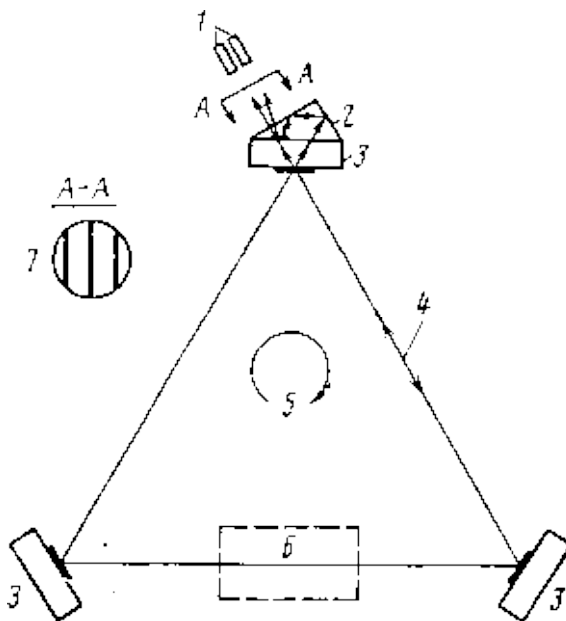


Рис. 1. Схема лазерного гироскопа: 1 - фотодиоды; 2 - смесительная призма; 3 - зеркала, образующие резонатор; 4 - оптический контур резонатора и направления распространения лучей; 5 - направление вращения; 6 - усиливающая среда; 7 - интерференционная картина

С точки зрения наблюдателя, вращающегося вместе с резонатором, время, за которое световая волна обходит замкнутый контур, будет больше для волны, распространяющейся в направлении вращения резонатора, чем для волны, распространяющейся в противоположном направлении. Так как скорость света постоянна, этот эффект интерпретируется наблюдателем как увеличение суммарной длины оптического пути в направлении вращения и сокращение длины пути в противоположном направлении. По скольку из условий резонанса следует, что на длине резонатора должно укладываться целое число оптических

длин волн, изменение пути должно сопровождаться сдвигом по частоте с противоположным знаком для встречных волн.

Возникающая разность частот встречных волн f прямо пропорциональна скорости Ω :

$$f = k\Omega \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности, называемый масштабным коэффициентом, выражается формулой

$$k = 4A/\lambda L \quad (2)$$

где A - площадь, ограниченная оптическим контуром резонатора; L - оптическая длина (периметр) резонатора; λ - длина волны излучения.

Таким образом, зная разность частот двух лучей и масштабный коэффициент, можно определить скорость вращения. Относительно выбранной оси кольцевой резонатор обладает максимальной чувствительностью к вращению. Она называется осью чувствительности. При вращении резонатора относительно другой оси разность частот встречных волн пропорциональна проекции угловой скорости на ось чувствительности.

Для измерения разности частот в кольцевом лазерном гироскопе небольшая доля лазерного излучения выводится через одно из зеркал. С помощью вспомогательных зеркал или призмы встречные лучи совмещаются и образуют в зоне считывания: интерференционную картину.

При отсутствии вращения, когда частоты обоих лучей равны, интерференционные полосы неподвижны относительно наблюдателя. При вращении, когда частоты двух лучей различны, интерференционные полосы перемещаются относительно наблюдателя со скоростью, пропорциональной разности частот, причем направление перемещения определяется направлением вращения. Отрезок, на который перемещается каждая полоса, соответствует интегралу разности частот и, следовательно, прямо пропорционален приращению угла поворота. Это именно тот вид информации, который необходим для бесплатформенной навигационной системы. Считывать информацию дискретным

образом, что важно для современных БИНС, в которых используются цифровые вычислительные машины, можно очень просто, подсчитывая количество интерференционных полос, прошедших в каждом направлении, и суммируя их с разными знаками.

Устройство для получения цифрового выхода ЛГ, т.е. преобразования приращений интеграла скорости в импульсы, состоит из двух фотодиодов, помещенных в плоскости интерференционной картины и смещенных друг относительно друга на $1/4$ интерференционной полосы. При перемещении интерференционных полос образуются синусоидальные сигналы с периодом, соответствующим перемещению одной полосы относительно диодов. По тому, какой из сигналов имеет опережение по фазе, определяется направление вращения. С помощью простой логической схемы и триггерного преобразователя из синусоидальных сигналов фотодиодов формируется импульсный цифровой сигнал, необходимый для вычислительной машины БИНС.

Обычно один импульс соответствует сдвигу интерференционной картины на одну полосу. Угол, на который при этом повернется гироскоп, обратно пропорционален масштабному коэффициенту и называется ценой импульса. Малая длина световой волны обеспечивает высокую разрешающую способность, цена импульса при типичных размерах ЛГ составляет величину порядка одной угловой секунды.

2. Основные погрешности

Реальная характеристика ЛГ в значительной мере определяется тем, на каких физических принципах основано устройство кольцевого лазера. Их совокупность мы будем называть оптико-физической схемой.

В литературе описано более сотни различных оптико-физических схем кольцевых лазеров: газовых, твердотельных; работающих в одно-, двух- и многомодовых режимах генерации; с линейной, круговой поляризацией излучения и т. д. Наилучшими с точки зрения применения в ЛГ, по мнению

зарубежных специалистов, являются газовые He-Ne-лазеры с длиной волны 0,63 и 1,15 мкм, накачка которых осуществляется постоянным током. Они хорошо исследованы. Излучение их отличается высокой когерентностью. Лазер может работать в непрерывном режиме, обладает достаточным коэффициентом усиления, высокой надежностью, большим сроком службы, требует маломощного источника питания и может быть сделан прочным и компактным.

По мнению ряда специалистов, наилучшим является одномодовый режим генерации с линейной поляризацией излучения. Однако в последнее время появились сообщения, свидетельствующие о значительных успехах, достигнутых при работе лазера на двух модах с ортогональными круговыми поляризациями.

Первые же эксперименты с ЛГ показали, что их реальная характеристика отличается от описываемой выражением (1). При малых угловых скоростях она оказалась существенно нелинейной, были обнаружены зона нечувствительности и смещение нуля, а также нестабильность характеристики во времени, от включения к включению и при изменении внешних условий.

Основные причины неидеальности, а также некоторые способы их устранения; были известны уже к началу 70-х гг. В настоящее время развита достаточно полная теория, описывающая основные физические процессы в кольцевых лазерах.

Причиной появления зоны нечувствительности и нелинейности характеристики при малых скоростях вращения является связь встречных волн, возникающая из-за обратного рассеяния небольшого количества света на элементах резонатора. Эта связь приводит к синхронизации частот волн ("захвату") в некоторой области скоростей вращения $-\Omega_L < \Omega < \Omega_L$, где Ω_L - порог захвата.

Вне области захвата характеристика подчиняется выражению

$$f = k\sqrt{\Omega^2 - \Omega_L^2} \quad (3)$$

и переходит в идеальную лишь при бесконечно больших скоростях (рис. 2). Для

того чтобы свести к минимуму связь встречных волн через обратное рассеяние, в качестве отражателей в ЛГ используют зеркала очень высокого качества: с многослойным (до 20 слоев) диэлектрическим покрытием, обеспечивающим коэффициент отражения более 99,7% и коэффициент обратного рассеяния менее 0,05%. Тем не менее типичная величина Ω_L - сотни градусов в час, и даже при самой тщательной обработке оптических поверхностей трудно ожидать значительного ее уменьшения из-за наличия апертур и активной среды.

В общем случае, как считают зарубежные специалисты, с помощью призм можно добиться меньшей величины обратного рассеяния, однако более высокая стоимость и сложная юстировка призм ограничивают их применение. Кроме того, в них существует остаточное или вызванное напряжениями двулучепреломление, которое в магнитных полях приводит к дрейфу нуля.

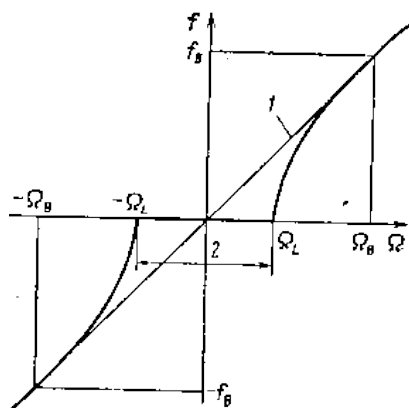


Рис.2 Влияние синхронизации частот на характеристику лазерного гироскопа: 1 - идеальная характеристика; 2 - зона нечувствительности

Проблема захвата породила большинство трудностей на пути создания ЛГ и явилась основным источником неудач. Для ее решения рабочую точку лазера смещают из области захвата за счет искусственно создаваемой разности оптических путей для встречных волн, которая приводит к расщеплению частот волн ("подставке") даже в отсутствие измеряемого вращательного движения прибора. Подставку можно создать с помощью контролируемого физического

вращения датчика либо с помощью любого из известных невзаимных оптических эффектов. Простейшим способом является создание постоянной подставки, например, за счет вращения с постоянной угловой скоростью Ω_B .

Высокие требования к стабилизации постоянной подставки (относительная стабильность выше 10^{-6}), необходимость калибровки и другие недостатки обусловили применение переменной подставки - реверсивного изменения разности частот-встречных волн с некоторым периодом $\tau = 2\pi/\nu$, где ν частота переключения знака подставки. Статическая характеристика ЛГ при переменной подставке показана на рис. 3.

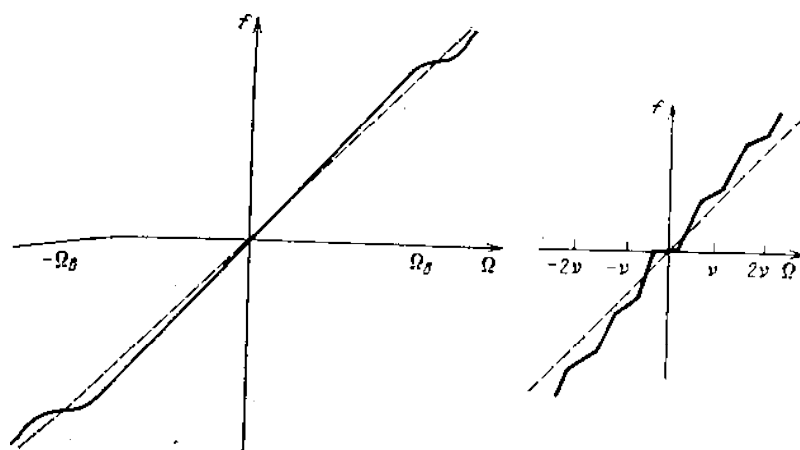


Рис.3. Характеристика лазерного гироскопа с переменной подставкой. Пунктиром показана характеристика идеального гироскопа. Справа в более крупном масштабе $\Omega_B \gg \nu$ показана мелкая структура характеристики, обусловленная синхронизацией разности частот встречных волн частотой переключения подставки

Величина полочек синхронизации, возникающих на частоте переключения, определяется частотой захвата Ω_L отношением частоты переключения к частоте подставки, а также формой подставки и может быть сделана менее 0,01 град/ч. Идеальной формой колебаний для знакопеременного смещения, по мнению зарубежных специалистов, являются прямоугольные импульсы.

Независимо от типа подставки для уменьшения ошибок, связанных с

обратным рассеянием, желательно иметь максимально большую амплитуду подставки. Практически амплитуда ограничивается величиной, которую можно с необходимой точностью стабилизировать, контролируя параметры подставки. Для вывода лазера из области захвата было предложено множество способов, однако практически используются только два: механические крутильные колебания и введение невзаимного элемента на основе магнитооптического эффекта (Фарадея или Керра).

Простейшей причиной нестабильности и невоспроизводимости масштабного коэффициента, как следует из формулы (2), служит изменение геометрических размеров резонатора. Из-за этого, в частности, для изготовления корпуса резонатора используют материал с ультранизким коэффициентом теплового расширения и высокой прочностью. Выражение (2) выведено в предположении, что резонатор лазера пустой. Реально в резонаторе всегда находится активная среда. Изменение ее дисперсионных свойств приводит к нестабильности и невоспроизводимости масштабного коэффициента, поэтому в реальных конструкциях стабилизируют полный разрядный ток и оптическую длину резонатора. Иногда применяют температурную стабилизацию всего лазера. Изменение параметров обратного рассеяния, как следует из формулы (3), также ведет к нестабильности масштабного коэффициента. Причиной смещения нуля может служить любой невзаимный оптический эффект. Если при разработке конструкции ЛГ не принимаются специальные меры, то дрейф нуля может по порядку величины превосходить измеряемую скорость вращения.

При отсутствии в резонаторе оптических элементов главной причиной смещения нуля и его нестабильности служит токовый дрейф, обусловленный эффектом Лэнгмюра и катафорезом. Для его устранения используют два встречно включенных разрядных промежутка с общим катодом и стабилизируют не только суммарный, но и разностный ток разряда.

Невзаимные эффекты насыщения в активной среде, которые обусловлены асимметрией потерь, распределения поля и поляризаций встречных волн, также

вносят вклад в аномальную дисперсию активной среды и приводят к неконтролируемому смещению нуля. Чтобы избежать их, конфигурацию лазера всегда выбирают симметричной по отношению к встречным лучам, стараются уменьшить число составляющих резонатор элементов, оптимизируют параметры активной среды и резонатора.

3. Устройство и характеристики ЛГ зарубежных фирм.

Среди фирм, разрабатывающих ЛГ наибольшего размаха достигла деятельность фирмы Honeywell. Общий объем затрат фирмы в этой области с учетом сумм, полученных по контрактам, и финансирования из собственных фондов достиг к 1978 г. 50 млн. дол.

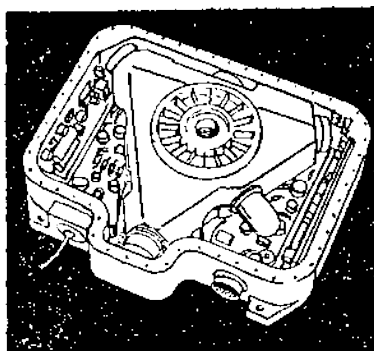


Рис. 4. Лазерный гироскоп GG-1300 фирмы Honeywell

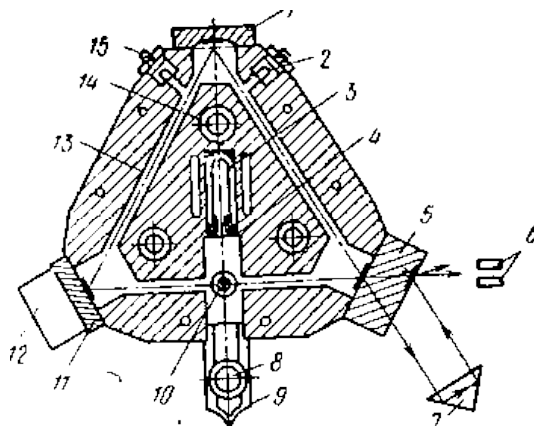


Рис.5. Устройство лазерных гироскопов фирмы Honeywell:

1 - вогнутое сферическое зеркало; 2 - анод; 3 - катод; 4 - противораспылительный

экран; 5 - выходное зеркало; 6 - фотодиоды; 7 - угольная призма; 8 - геттер; 9 - отвод для газонаполнения; 10 - диафрагма; 11 - плоское зеркало; 12 - пьезо-привод; 13 - лазерный канал; 14 - крепление; 15- подвод питания

Только на разработку технологии промышленного производства за последние несколько лет было ассигновано 10 млн. дол., что обеспечило устойчивые темпы налаживания серийного выпуска. Он был начат в конце 1978 г. в одном из цехов завода фирмы Honeywell в Миннеаполисе (стоимость капиталовложений 2 млн. дол., производственная площадь 400 кв. м). Первоначально намеченный ежемесячный объем выпуска - 30 приборов, в дальнейшем планируется его увеличение до 300 приборов при расширении производственной площади до 600 кв. м.

За 15 лет, прошедших с начала разработок, фирмой создана и испытана серия моделей, основанных на одной и той же оптико-физической схеме и имеющих сходные конструкции (рис. 5).

Устройство ЛГ фирмы Honeywell схематически показано на рис.4. Лазер имеет треугольную конфигурацию резонатора, работает в одномодовом режиме генерация на длине волны 0,63 мкм. Одно из зеркал для облегчения юстировки и создания требуемой структуры мод сделано сферическим, остальные - плоские. Встречные волны имеют линейную поляризацию, ортогональную плоскости падения. Моды с другой поляризацией подавляются за счет небольшой разницы в коэффициентах отражения, возникающей при наклонном падении. Подавление поперечных мод происходит с помощью диафрагмы.

ЛГ имеет моноблочную конструкцию, обеспечивающую наибольшую жесткость. Корпус изготавливается из сплошного куска стеклокерамики типа Ger-Vit, в котором просверливаются каналы для активной среды и электрических вводов. На отполированных поверхностях блока с помощью оптического контакта крепятся подложки диэлектрических зеркал.

Стеклокерамика Ger-Vit фирмы Owens Illinois является в настоящее время

одним из наиболее перспективных материалов для изготовления корпусов ЛГ. К числу ее достоинств относится высокая прочность ($\sim 10^6$ кг/см²), низкий коэффициент теплового расширения ($\sim 3 \cdot 10^{-8}$ град⁻¹) и малый коэффициент диффузии He. При столь низком коэффициенте теплового расширения изменение длины оптического пути при изменении температуры даже на 100°С составляет одну, две длины волны, легко отрабатывается пьезозеркалом и не приводит к существенному увеличению ошибки ЛГ. Спад давления He в ЛГ GG-1300 из материала Ger-Vit не превышает 1% за 10 лет, и это является одним из условий, обеспечивающих его сохраняемость и ресурс. Решить проблему захвата фирма Honeywell смогла, используя знакопеременную подставку, которая создается с помощью крутильных колебаний лазера. Колебания имеют синусоидальную форму с амплитудой 200-400 угл. с и частотой 100-200 Гц. При этом оказалось возможным, неподвижно закрепляя возвратную призму, осуществить оптическую компенсацию сигнала подставки и тем самым уменьшить обусловленные ею шумы. Использование внутренних зеркал и применение механической подставки отражает стремление к уменьшению числа оптических поверхностей в резонаторе и, следовательно, области захвата. В то же время это порождает ряд технологических проблем, включая обеспечение срока службы и качества зеркал, непосредственно соприкасающихся с плазмой.

В значительной мере фирме удалось преодолеть эти трудности. Достижения в области технологии (прежде всего разработка стойких покрытий для зеркал) позволили получить среднюю наработку приборов на отказ 20'000 ч. Прогнозируемая наработка составляет 50'000 ч. Следует, однако, отметить, что изготовление таких ЛГ требует много ручного труда, тщательного контроля и подгонки в условиях вакуумной гигиены, что напоминает технологию производства механических гироскопов и, конечно же, ведет к увеличению стоимости.

Упростить технологию и уменьшить стоимость, одна из насущных задач

фирмы Honeywell. Намечается при крупном промышленном производстве довести стоимость серийного образца ЛГ до 4000 дол. Модели фирмы Honeywell серии GG отличаются друг от друга габаритными размерами, длиной волны излучения и соответственно точностными характеристиками. Гироскопы имеют периметр от 9,75 до 42,75 см и работают в видимом ($\lambda=0,63$ мкм) или ИК ($\lambda=1,15$ мкм) диапазонах. В последних моделях отдается предпочтение длине волны 0,63 мкм, так как: точностные характеристики в этом случае получаются намного выше.

Из серии GG наиболее отработанной является модель GG-1300 с периметром 43 см. Параметры ее приведены в таблице. Всесторонние лабораторные испытания этой модели проводились фирмой Honeywell, Центром вооружения ВМС, лабораторией Дрейпера. Точностные параметры, указанные в таблице, получены только в нормальных условиях и после некоторого прогрева. Под временем готовности 1 с подразумевается не интервал, необходимый для достижения номинальных характеристик, а время, через которое ЛГ начинает функционировать.

Результаты исследования фирмой Honeywell стабильности дрейфа нуля одного из приборов в течение года работы в нормальных условиях приведены на рис. 6.

При изменении температуры окружающей среды стабильность дрейфа нуля существенно ухудшается. Наибольшее влияние, как установили специалисты лаборатории Дрейпера, оказывают градиенты температур: скачок температуры на 90°C приводит к изменению дрейфа нуля на 0,6 град/ч.

Результаты испытаний, проведенные в диапазоне температур от -18 до 71°C, показывают, что после установления теплового равновесия дрейф нуля восстанавливается с точностью $\pm 0,02$ град/ч, что соответствует среднеквадратичной величине дрейфа 0,007 град/ч (1σ). Изменение дрейфа нуля в течение первого часа после включения, по утверждению специалистов лаборатории Дрейпера, достигает 0,1 град/ч. Температурные уходы ЛГ

воспроизводимы, и поэтому его точность можно повысить, используя систему термокомпенсации. Фирма Honeywell осуществляет термокомпенсацию уже в навигационной системе. Однако ею не поясняется возможность обеспечения точностных характеристик при воздействии вибраций, ударов, линейных и угловых ускорений, так как использование механических крутильных колебаний приводит к уменьшению жесткости системы и возникновению дополнительных механических резонансов. Испытания приборов в условиях механических воздействий фирма планирует провести в ближайшее время.

К числу последних разработок фирмы относятся модели GG-1328 и GG-1342, имеющие периметр соответственно 21 и 32 см. В настоящее время приборы проходят всесторонние испытания.

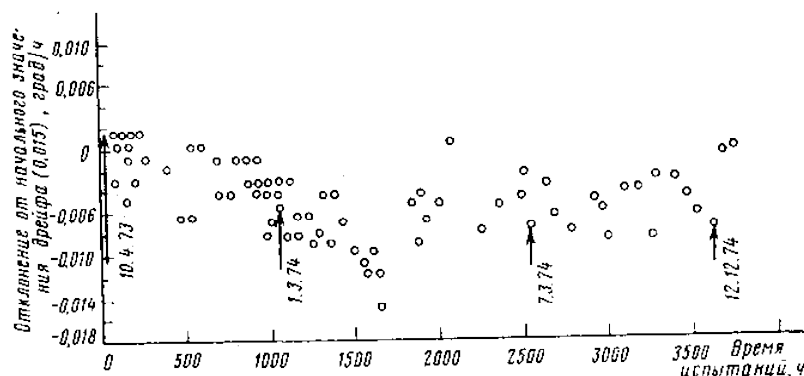


Рис. 6. Долговременная стабильность дрейфа нуля ЛГ GG-1300 фирмы Honeywell (серийный номер модели S/N 174)

Точностные характеристики модели GG-1342, по утверждению представителя фирмы, мало отличаются от характеристик модели GG-1300, несмотря на значительное сокращение размеров и массы. Некоторые параметры прибора GG-1328 приведены в таблице. В начале 80-х гг. на этом приборе намечается получить уровень характеристик модели GG-1300. Прогресс связывается с углублением знаний о физике процессов, протекающих в кольцевом лазере, улучшением технологии производства, повышением качества элементов ЛГ. Большинство последних достижений обусловлено снижением рассеяния на

зеркала, ужесточением контроля загрязнения частицами и улучшением очистки лазерного блока. В дальнейшем предполагается также осуществить совершенствование электронного оборудования и программ обработки сигнала (на основе более точной модели ошибок и температурной компенсации).

Оптико-физические схемы, аналогичные схеме фирмы Honeywell, используются также фирмами Litton, Rockwell, Ferranti, SFENA. До последнего времени им не удавалось получить точности, необходимые для инерциальной навигации. Лишь в 1980 г. появился ряд статей, в которых сообщается о разработках фирмы Litton, не уступающих по параметрам приборам фирмы Honeywell.

Отличительной особенностью конструкции ЛГ фирмы Litton является квадратная конфигурация резонатора. Преодолев сложности, связанные с увеличением числа зеркал, фирма Litton получила ряд преимуществ. Прежде всего, это повышение чувствительности при тех же габаритах датчика за счет увеличения площади, охватываемой оптическим контуром. Другое важное преимущество заключается в упрощении механической обработки блока из стеклокерамики, так как базовые поверхности параллельны или перпендикулярны друг другу.

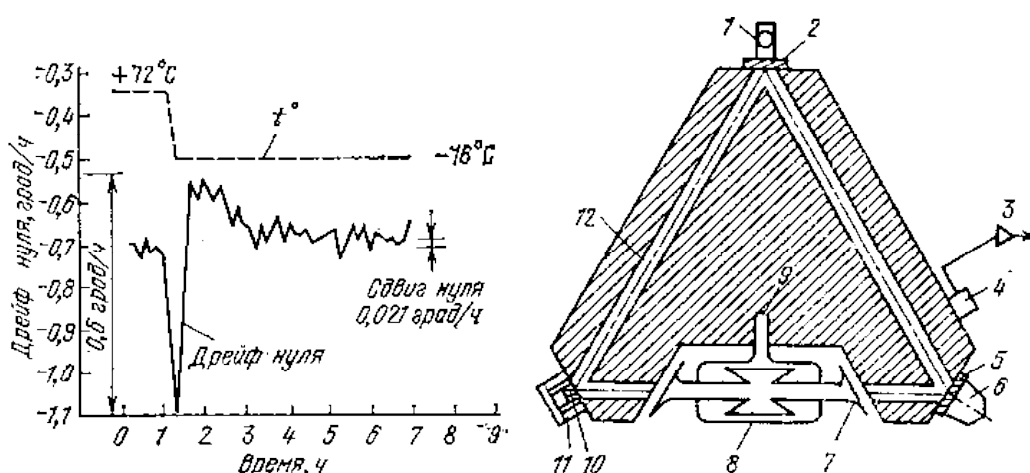


Рис. 7. Устройство лазерного гироскопа фирмы Sperry:

1 - электромагнит; 2 - магнитное зеркало; 3 - предусилитель; 4 - фотодиоды; 5 - выходное зеркало; 6 - смесительная призма; 7 - анод; 8 - катод; 9 - геттер; 10 - зеркало; 11 - пьезопривод; 12 - лазерный канал

Разработав собственную технологию изготовления высококачественных зеркал, фирма Litton налаживает их выпуск с объемом, достаточным для обеспечения промышленного производства 500 ЛГ в месяц, к организации которого планируется приступить в ближайшее время.

Фирмой Litton разработана серия приборов типа LG с периметром резонатора от 30 до 6 см. Характеристики модели LG-2717 (периметр 17 см) даны в таблице.

ЛГ фирмы Sperry имеют иную оптико-физическую схему. Основное отличие заключается в способе создания частотной подставки. Для этого в них используются магнитооптические эффекты, первоначально - эффект Фарадея. Однако при помещении в резонатор ячейки Фарадея возникает необходимость температурной стабилизации, а также существенно возрастает стоимость системы. В начале 70-х гг. фирма разработала новый способ, основанный на использовании поперечного магнитооптического эффекта Керра (магнитное зеркало). Одним из недостатков такого решения является увеличение потерь резонатора вследствие поглощения в магнитном зеркале. Проводятся исследования возможности снижения потерь посредством использования вместо ферромагнитных покрытий зеркал магнитных кристаллов на основе гранатов.

Большие потери резонатора обусловили вторую особенность оптико-физической схемы фирмы Sperry - использование перехода Ne в ИК диапазоне ($\lambda=1,15$ мкм) с достаточно большим усилением.

Сигнал подставки имеет форму знакопеременных прямоугольных импульсов, оптимальную с точки зрения преодоления захвата. Вместе с тем при выбранном способе вывода лазера из захвата не удастся осуществить оптическую компенсацию сигнала подставки, поэтому полезный сигнал снимается лишь с интервалами, кратными - периоду подставки.

ЛГ фирмы Sperry имеют модульную конструкцию (рис. 7). Корпус в этом случае служит лишь основой, на которой механически крепятся элементы лазера: усилитель, отпаянная стеклянная трубка с He-Ne - смесью, зеркала, образующие

резонатор, и невзаимный элемент. После того как прибор собран, он помещается в герметичный металлический контейнер, который затем вакуумируется. Таким образом, в этом случае отпадает необходимость в вакуумной очистке элементов резонатора, облегчается монтаж и сборка ЛГ. По утверждению представителя фирмы Sperry, такая конструкция позволит значительно снизить стоимость производства: трехосный ЛГ фирмы Sperry будет стоить лишь немногим больше одноосного прибора фирмы Honeywell. Предполагаемая цена трехосной модели SLIC-7 (с вспомогательной электроникой) составит 8000 дол. при выпуске 1000 изделий.

При использовании разрядных трубок упрощается решение проблемы срока службы. Фирма Sperry сообщает, что ресурс приборов SLG-15 составляет 30 000 ч, SLIC-15 - 20 000 ч. Наиболее долговечный из пятидесяти одноосных приборов, изготовленных в период с 1971 по 1977 гг., проработал уже более 54 тыс. ч.

Другим преимуществом конструкции ЛГ фирмы Sperry, которое определяется используемым способом выведения из захвата, является полное отсутствие движущихся механических частей. Однако наличие магниточувствительных элементов требует весьма тщательного экранирования. Приборы фирмы Sperry заключены в трехслойные магнитные экраны.

В настоящее время фирма сообщила о создании трех моделей ЛГ. Это одноосный гироскоп SLG-15, его трехосный аналог SLIC-15 и уменьшенный трехосный вариант SLIC-7. Лазерный гироскоп SLG-15 с периметром резонатора 38 см готов к промышленному производству. Как видно из таблицы, этот гироскоп имеет близкие к GG-1300 массу и объем, но уступает ему по точностным характеристикам.

Многочисленные испытания, проведенные правительственными организациями и фирмами-заказчиками, а также лабораторией Дрейпера, в основном подтвердили рекламируемые параметры. Хорошо известно влияние внешних условий на его характеристики: температурная чувствительность менее $\pm 0,02$ град/ч/К, магнитная менее 0,03 град/ч/Э, допустимые ускорения , до 20 g.

На основе SLG-15 был создан шестиосный блок чувствительных элементов для определения с высокой надежностью параметров трехмерного движения. В нем объединены шесть приборов, расположенных по граням додекаэдра таким образом, что оси чувствительности каждого из них находятся под углом 64° относительно осей двух соседних гироскопов. В такой системе каждый гироскоп может определять движение относительно двух координатных осей. Избыточная информация позволяет обнаружить отказы любых двух гироскопов и использовать вместо отказавших гироскопов сигналы с исправных, а при совместной работе, повысить точность системы.

Прибор SLIC-15 отличается оригинальным конструктивным решением - в одном блоке смонтированы одновременно три гироскопа, причем таким образом, что их оси чувствительности ортогональны и плечо каждого из них пересекает плоскости резонаторов двух других. Такой подход позволил более чем вдвое уменьшить объем трехосной системы и увеличить ее жесткость. Точностные характеристики системы при этом не изменились. Такое же конструктивное решение использовано в приборе SLIC-7, каждый из гироскопов которого имеет вдвое меньший периметр резонатора.

Внешний вид прибора показан на рис. 8. По мнению зарубежных специалистов, значительным шагом вперед в создании лазерных датчиков угловой скорости, не имеющих движущихся частей, явилась разработка дифференциального лазерного гироскопа DILAG.

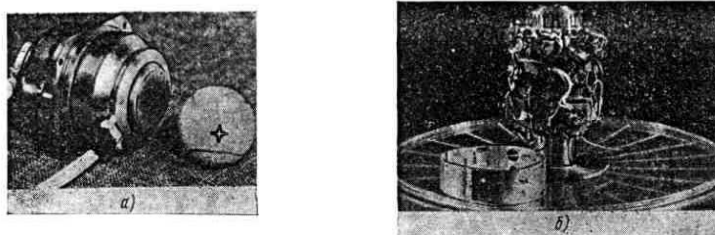


Рис. 8. Малогабаритный трехосный лазерный гироскоп модели SLIC-7 фирмы Sperry: а) в корпусе, б) без корпуса

Принципиальным отличием оптико-физической схемы этого прибора от ранее рассмотренных является использование четырехчастотного режима работы на модах с круговой поляризацией излучения. При этом одновременно возбуждаются две пары встречных волн, поляризации которых ортогональны. Образно говоря, DILAG , это два лазерных гироскопа, имеющих общий резонатор. Излучение одного гироскопа имеет правую круговую поляризацию, а другого - левую. Для вывода обоих гироскопов из зоны захвата используется одна и та же ячейка Фарадея. Так как поляризации излучения гироскопов различны, ячейка Фарадея создает в каждом из них смещение частоты, одинаковое по величине, но противоположное по знаку. При суммировании выходных сигналов гироскопов смещения, вызванные ячейкой Фарадея, взаимно уничтожаются, а обусловленные вращением - складываются. Такое решение позволяет избежать трудностей, связанных с использованием ячейки Фарадея; снижаются требования к стабильности подставки, уменьшается влияние внешних магнитных полей. Кроме того, появляется возможность использовать постоянное смещение из области захвата и отказаться от переменной подставки, которая вносит дополнительные шумы и увеличивает нелинейность характеристики в результате того, что лазер в каждом периоде подставки проходит через зону захвата.

Следует отметить, что использование круговой поляризации излучения само по себе уменьшает связь встречных волн через обратное рассеяние и влияние захвата на характеристики ЛГ.

Другими преимуществами четырехчастотного режима являются: повышение чувствительности в два раза; понижение шума вследствие взаимного уничтожения коррелированных погрешностей; более быстрый прогрев и соответственно меньшее время готовности; меньшая чувствительность к изменению условий окружающей среды.

Идея использования четырехчастотного режима принадлежит де Лангу и была сформулирована им еще в 1962 г. Однако при ее практической реализации

возник ряд существенных технических трудностей, для преодоления которых потребовались длительные теоретические и экспериментальные исследования.

Длина резонатора регулируется' посредством изменения температуры кристалла кварца ячейки Фарадея. Таким образом, регулировка длины резонатора, так же как и устранение зоны нечувствительности, осуществляется без использования подвижных деталей, и том числе пьезокерамических.

Таким образом, точностные характеристики, достаточные для широкого круга областей применения, могут быть обеспечены с помощью различных оптико-физических схем. Их практическая реализация приводит к созданию конструкций, отличающихся по сложности и стоимости изготовления, по габаритно-массовым и эксплуатационным характеристикам. Поэтому, как считают зарубежные специалисты, несмотря на стремление к унификации ЛГ и оборудования к ним, не следует ожидать, что применение найдут гироскопы, основанные только на какой-либо одной из схем.

Оценкой различных типов ЛГ и решением вопроса о возможности их применения в конкретных системах активно занимаются зарубежные государственные и военные ведомства, а также фирмы-потребители навигационных систем.

4. Применение ЛГ

Последние достижения зарубежных фирм в области лазерной гироскопии , повышение надежности и срока службы ЛГ, улучшение точностных характеристик до уровня хороших механических гироскопов, а также определенные преимущества перед гироскопами других типов - обеспечивают реальную возможность широкого применения ЛГ в бесплатформенных системах инерциальной навигации, управления и стабилизации положения объектов в авиации, морской, ракетной и космической технике.

Использование ЛГ позволит полностью реализовать преимущества бесплатформенных систем и, кроме того, в соответствии с прогнозом

зарубежных специалистов обеспечит значительное снижение стоимости таких систем при выпуске больших промышленных партий. В частности, фирма Honeywell, проведя в 1974 г. исследования по вопросу себестоимости БИНС на ЛГ, пришла к выводу, что эксплуатационные расходы и стоимость таких систем по крайней мере в 2 раза ниже, чем при использовании обычного оборудования. Тенденции изменения стоимости ИНС, по данным исследовательского центра ВМС США, показаны на рис. 9.

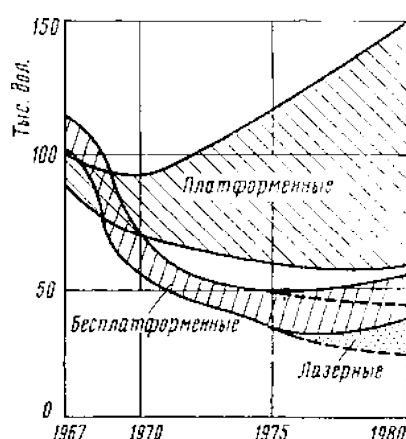


Рис.9. Тенденции изменения стоимости инерциальных навигационных систем (при 6%-ной инфляции)

К настоящему времени наибольших успехов в разработке БИНС на ЛГ достигла фирма Honeywell. Еще в 1972 г., добившись существенного улучшения параметров ЛГ, эта фирма на собственные средства разработала навигационную систему для оценки эксплуатационных характеристик прибора модели GG-1300. После испытаний этой модели в Центре вооружения ВМС с фирмой был заключен контракт стоимостью 2,5 млн. дол. на разработку и испытания усовершенствованной инерциальной системы управления для тактических ракет (ATIGS) на лазерных гироскопах. Целью этой программы являлась разработка системы управления для высокоскоростных тактических ракет класса 'воздух , земля' с дальностью 160,320 км.

Первые образцы лазерных систем для проведения лабораторных и летных

испытаний были поставлены в 1974 г. Во время летных испытаний, которые проводились в феврале, марте 1975 г. на борту палубного штурмовика А-7 (без отделения системы от носителя), вероятная круговая ошибка определения местоположения самолета составила 4,1 км/ч. В ходе дальнейших испытаний были усовершенствованы программы математического обеспечения ЭВМ системы ATIGS, благодаря чему величина средней круговой вероятной ошибки была снижена до 2,3 км/ч.

Ракетным командованием МО США заключен контракт на создание опытного образца упрощенной малогабаритной лазерной инерциальной системы управления Н-700 для управляемых тактических ракет класса 'земля,земля÷ с увеличенной дальностью полета (программа SIG-D), в которой используется ЛГ GG-1328, разработанный специально для таких применений. Предполагалось, что ошибка системы с таким ЛГ увеличится до 9- 18 км/ч. Однако результаты предварительных испытаний, проведенных Центром вооружения ВМС, показали, что точностные характеристики превышают ожидаемые и составляют 3,7 - 7,4 км/ч.

ВМС США приступили к экспериментам по использованию усовершенствованных систем ATIGS и Н-700 на новой ракете класса 'воздух , земля÷ большой дальности. В настоящее время ВВС и ВМС разработали совместную программу по созданию недорогой инерциальной системы наведения на ЛГ целого семейства авиационного вооружения тактического назначения.

Кроме разработки фирмы Honeywell в рамках этой программы будет рассмотрена инерциальная система наведения на основе трехосного лазерного гироблока SLIC-7 фирмы Sperry. Ввиду малых габаритов, массы и низкой стоимости этого блока перспективно его применение в системе наведения планирующей бомбы. Точность системы с лазерным блоком SLIC-7 по предварительным данным будет вполне достаточной. В соответствии с расчетом вероятная круговая ошибка определения местоположения бомбы к концу пятой минуты составит около 240м.

В последних сообщениях отмечается, что фирма Litton разрабатывает системы управления ракет на ЛГ LG-2717, продемонстрировавшие на испытаниях точность 2,2 км/ч.

Зарубежные обозреватели предполагают, что системы наведения для тактических ракет и планирующих бомб представляют самую обширную область применения ЛГ и именно в этой области фирмы-разработчики лазерных инерциальных систем ожидают наиболее крупные заказы. По мнению представителя фирмы Sperry, объем рынка ЛГ, применяемых в военной технике тактического назначения, в предстоящие пять лет, составит десятки тысяч изделий ценой до 20 000 дол.

Практически все зарубежные фирмы, разрабатывающие ЛГ, рассматривают возможность создания на их основе БИНС для авиации, которые, как ожидается, при достаточно высоких точностных характеристиках будут значительно более надежными и дешевыми в производстве и эксплуатации, чем системы обычного типа. Наиболее целесообразным, по мнению специалистов Эймсского научно-исследовательского центра NASA, является использование лазерных БИНС на самолетах с коротким и вертикальным взлетом и посадкой.

Хотя объем рынка ЛГ для авиации будет меньше, чем для ракетной техники, ожидается, что в ближайшие десять лет сумма продаж и объем ремонтных работ БИНС на ЛГ для военных и гражданских вертолетов и самолетов достигнет 1 млрд. дол. в год.

Признанным лидером в области разработок лазерных авиационных БИНС является фирма Honeywell. Испытания системы ATIGS в лабораторных условиях в 1974 г. продемонстрировали возможность получения высокой точности, необходимой для самолетных БИНС (вероятная круговая ошибка 1,85 км/ч). Вскоре после этого фирма разработала и испытала экспериментальный образец такой системы (LINS) на ЛГ GG-1300. При испытаниях в передвижной лаборатории фирмы, продолжавшихся в общей сложности 1300 ч, система LINS показала точность выше 1,3 км/ч. В 13 испытательных полетах, проводившихся

ВВС США, LINS в течение 230 ч безотказной работы обеспечила точность 1,65 км/ч. Этими испытаниями объясняется вновь возросшая заинтересованность к разработке лазерных БИНС для авиации со стороны ВВС и ВМС.

ВВС предполагают использовать лазерную БИНС в перспективных транспортных самолетах и истребителях. Уже проведены испытания LINS, показавшие, что она может использоваться на транспортных самолетах TriStar L1011.

ВМС рассматривают возможность замены в 80-гг. платформенной системы фирмы Litton, установленной на самолетах Grumman E-2C, F-14, A-6E, Lockheed-3A и' других, лазерной системой, а также использования ее на новых палубных самолетах с вертикальным взлетом AV8B. В соответствии с требованиями Центра по разработкам авиационных систем ВМС объем такой системы должен быть на 1/4 меньше объема LINS и составлять 20 дм³. Для того чтобы удовлетворить этому требованию, фирма разработала новую модель ЛГ GG-1342 с меньшими, чем у GG-1300, габаритами и сходными точностными характеристиками.

Первый военный промышленный контракт стоимостью 5 млн. дол. на поставку LINS на ЛГ LG-1342 для самолетов с вертикальным взлетом AV8B заключен в 1980 г. В данном случае фирма-заказчик стремится в первую очередь реализовать одно из основных преимуществ ЛГ - малое время готовности. В лазерной системе автоматическая выставка осуществляется за 1,5 - 4,0 мин - значительно быстрее, чем в обычных системах.

Поставка LINS для проведения испытаний должны быть начаты в августе 1981 г. Летные испытания будут проходить в 1982 г. Промышленные поставки запланированы на 1983 г.

Фирма Boeing будет использовать LINS на ЛГ GG-1342 в перспективных пассажирских авиалайнерах нового поколения серии 7X7. В начале 1978 г. фирме были поставлены первые опытные образцы для проведения испытаний, а в ноябре 1978 г. уже появилось сообщение, что ею оформлен заказ на сумму 100 млн. дол.

на промышленные поставки. Фирма Honeywell уже приступила к поставкам первой промышленной партии в 400 систем в начале 1981 г. Возможен дополнительный заказ еще на 200 систем. Система LINS обойдется фирме Boeing вдвое дешевле использовавшейся ранее системы. Время готовности LINS составляет 3 мин (у обычных систем 10 мин), среднее время наработки до отказа 4500 ч (на порядок больше, чем у систем обычного типа).

Традиционный поставщик БИНС, фирма Litton, уступила лидерство в области лазерных систем на первом этапе их внедрения фирме Honeywell, начав исследовательские работы в этой области на 10 лет позже. Однако в настоящее время, опираясь на свой многолетний опыт в создании навигационных систем, фирма Litton; ускоренными темпами организует серийное производство систем LTN-90 на ЛГ модели LG-8028. Европейская фирма Airbus Industrie уже заключила контракт на поставку этих систем для аэробусов A310. Первые промышленные образцы LTN-90 намечено было поставить для летных испытаний в апреле 1981 г. На опытных образцах уже достигнута точность около 1 км/ч. Планируемое среднее время наработки до отказа 5000 ч.

Возможность применения ЛГ в авиационных БИНС пытаются реализовать и другие фирмы.

Фирмой Raytheon разрабатывается авиационная БИНС на основе 4-частотного ЛГ RB-25, которая будет иметь объем 20 дм³ и массу 14 кг. В дальнейшем предполагается сократить ее габариты, используя ЛГ с периметром 15 см, который по объему вдвое меньше RB-25. Намечается провести летные испытания первого варианта системы.

Для космических применений фирмой Sperry был разработан ЛГ модели SLG-15. Три таких прибора, объединенных в единую измерительную систему, используются в БИНС Sperry Model 8300. Для тех же применений предназначен трехосный блок SLIC-15.

В результате испытаний в лаборатории и на передвижной установке в Маршалльском центре космических полетов NASA система 8300 показала

точность навигации около 6 км/ч, а во время летных испытаний на вертолете SH-3 около 9 км/ч. Проводились также испытания этой системы на самолетах C-141 и T-33. В системах управления противоракет требуются датчики с очень широким динамическим диапазоном (до $\mu 1000$ град/с, при кратковременных увеличениях скорости до $\mu 5000$ град/с), способные работать в чрезвычайно жестких условиях (линейные ускорения до 400 g, удары до 3000 g и т. д.). Для этой цели фирмой Sperry был разработан лазерный блок SLIC-7. Пока имеются сообщения только об отдельных испытаниях этого прибора в лабораторных условиях, где он показал довольно высокую точность. Основываясь на результатах многочисленных и всесторонних испытаний прибора SLIC-15, который имеет аналогичную конструкцию и собирается по той же технологии, представители фирмы выражают уверенность в том, что он удовлетворит и всем остальным требованиям. Система на основе блока SLIC-7 имеет объем 4 дм³ и массу 6,4 кг. Среднее время наработки до отказа 5000 ч. Стоимость 18 500 дол.

Опираясь на результаты проведенных лабораторных и летных испытаний, фирмы Honeywell и Sperry рассмотрели и ряд других возможных применений разработанных приборов. Одно из них, управление маневрирующими головными частями (МГЧ) стратегических баллистических ракет.

По контракту с организацией космических и ракетных систем ВВС США (SAMSO) фирма Honeywell с 1975 г. разрабатывает лазерную БИНС (DINS) с большим сроком хранения и малым временем готовности для МГЧ. Масса системы 14 кг. Согласно имеющимся сообщениям на ноябрь 1979 г. были намечены летные испытания DINS в составе ракетного комплекса. Ведутся переговоры об использовании ЛГ фирмы Honeywell для крылатых ракет морского базирования Tomahawk.

По мнению разработчиков фирмы Sperry, малое время готовности, прочность, небольшие размеры, низкие акустические шумы (вследствие отсутствия движущихся частей) делают прибор SLIC-7 пригодным для систем ориентации и управления торпед. Проведенный ими тщательный анализ показал,

что без предварительной калибровки среднеквадратичная ошибка ориентации по крену и тангажу при входе в воду меньше 10 угл. мин, а ошибка наведения в конце 20-минутного периода движения составит приблизительно 0,4 угл. град.

Широкий спектр применений лазерных БИНС на флоте, в авиации и ракетной технике откроется после введения в действие в середине 80-х гг. глобальной спутниковой системы навигации (GPS).

Комбинация лазерных БИНС с этой системой, которая позволит корректировать показания датчика, представляется зарубежным специалистам очень практичной и обеспечит уникальные возможности навигации. По мнению разработчиков фирмы Sperry, оптимально комбинируется с GPS инерциальная навигационная система с лазерным блоком SLIC-7. Согласно проведенным оценкам при этом удастся уменьшить среднеквадратичную ошибку определения местоположения летательного аппарата до 15 м, скорости - до 0,15 м/с, углов тангажа и крена - до 0,5 угл. мин, курса - до 3 угл. мин.

По оценке зарубежных специалистов, практичными и экономически эффективными окажутся комбинации лазерных БИНС и с другими спутниковыми навигационными системами (Loran, Navstar и т. д.).

В последнее время за рубежом уделяется большое внимание одной из новых областей применения ЛГ - в артиллерийском вооружении. В данном случае открывается возможность использования ЛГ по двум основным направлениям: в системах стабилизации и наведения орудий и в системах топопривязки. В решении первой задачи уже достигнуты существенные успехи; в 1980 г. заключен первый промышленный контракт стоимостью 1,2 млн. дол. на поставку двух систем стабилизации Mark 16, Mod 11, которые будут использоваться совместно с системой управления огнем корабельных орудий Mark 68. Система стабилизации, включая три ЛГ и цифровой микропроцессор, ориентирует в вертикальной плоскости 127-мм пушку, что обеспечивает высокую точность стрельбы. Фирма Sperry ожидает в ближайшее время новые заказы на поставку таких систем.

Вторая задача требует использования более точных приборов; возможность

ее решения с помощью ЛГ детально проанализирована специалистами фирм Honeywell и Ferranti. Ими сделано заключение, что ЛГ позволяет значительно повысить эффективность и мобильность артиллерийских установок уже при имеющемся техническом уровне- время геодезической привязки и прицеливания сократится с 0,5 - 1 ч до 2 мин.

Таким образом, фирмы Honeywell, Litton и Sperry вплотную подошли к внедрению своих приборов. Многие фирмы, как правило, вообще не указывают конкретные системы, в которых предполагается использовать разрабатываемые приборы, и ограничиваются общими замечаниями относительно возможностей их применения. Например, фирма Ferranti и английский филиал фирмы Sperry по параллельным контрактам с Британским МО работают над созданием ЛГ для БИНС военных самолетов.

Летные испытания систем намечены на 1982 г. Фирма, которая добьется более высоких результатов, получит контракт на разработку промышленного образца системы с тем, чтобы во второй половине 80-х гг. начать ее серийное производство.

5. Заключение

Решение фирмы Boeing установить на своих новых самолетах 757 и 767 инерциальные системы с ЛГ и начавшиеся в 1981 г. промышленные поставки как нельзя лучше характеризуют современное состояние лазерной гироскопии, когда ЛГ во многом доказали свою конкурентоспособность по сравнению с традиционными устройствами, на них ожидаются новые заказы, и ведущие фирмы приступили к промышленному выпуску своих приборов или готовятся его начать.

Разработка лазерных гироскопов за рубежом ведется широким фронтом , в ней участвует более пятнадцати фирм, привлекаются силы ряда национальных административных военных и научных организаций. Одновременно рассматриваются несколько оптико-физических схем.

В США принята обширная координационная программа, направляющая усилия ведомств и фирм на разработку унифицированных и стандартных конструкций, пригодных для широкого круга областей применения.

Характерной особенностью разработок зарубежных фирм является то, что они производят не отдельные гироскопы, а полностью системы навигации и управления. Такой подход позволяет оптимизировать точностные и габаритно-массовые характеристики системы в целом, что дает значительный выигрыш по этим параметрам, универсальности применения и стоимости производства.

Наибольших успехов добились фирмы Honeywell и Sperry. Они придерживаются различных оптико-физических схем. Каждая из них имеет свои преимущества, поэтому, несмотря на конкуренцию, намечается естественный раздел сфер применения. Основные научно-технические решения были ими найдены к середине 70-х гг. и с тех пор мало изменились. В настоящее время все приборы одной фирмы имеют одну и ту же оптико-физическую схему, собираются по единой технологии и отличаются, в основном, габаритами.

Фирма Honeywell уже в 1973 г. получила в нормальных условиях на опытных образцах точностные характеристики, которые, судя по оценкам специалистов, близки к предельным для приборов с принятой в этой фирме оптико-физической схемой и конструкцией. Усилия фирм Honeywell и Sperry и далее будут направлены на обеспечение высоких точностных характеристик и надежности в условиях эксплуатации и при габаритах, требуемых для конкретных приложений.

Интенсифицируются поиски новых научно-технических решений, которые привели бы к более надежным, дешевым конструкциям, имеющим лучшие точностные характеристики при тех же габаритах, массе и условиях эксплуатации. Среди таких решений необходимо отметить оптико-физическую схему DILAG, которая развивается одновременно несколькими фирмами.

За годы развития лазерной гироскопии создан солидный научный

фундамент, мощная конструкторская и технологическая база разработок, поэтому другие фирмы, начавшие разработку значительно позже Honeywell и Sperry и существенно отстающие сейчас, надеются дойти до промышленных образцов гораздо быстрее. Французская фирма SFENA, которая, по существу, повторяет путь Honeywell, надеется пройти его за 8 лет.

Несмотря на то, что точность ЛГ еще далека от той, которую показывают лучшие механические гироскопы, выше 0,001 град/ч, разработчики этих зарубежных фирм, большинство из которых известны своими достижениями в области традиционной гироскопии, ясно осознали потенциальные возможности ЛГ и увидели основные области применения, где они могут уже в ближайшее время успешно конкурировать с обычными гироскопами по точности, превосходя их по ряду других параметров. Это системы, требующие точности 0,01 - 10 град/ч и работающие в тяжелых эксплуатационных условиях:

- навигации и курсоуказания маневренных самолетов и ракет, а также самолетов с коротким (или вертикальным) взлетом и посадкой;
- наведения ракет ПВО, подвергающихся значительным ускорениям и перегрузкам;
- управления огнем подвижных артиллерийских и ракетных установок;
- управления кораблями, а также в системах стабилизации корабельных орудий и телескопов;
- наведения торпед;
- управления МГЧ и возвращаемыми космическими кораблями.

Сообщения зарубежных фирм показывают, что они настроены весьма оптимистично относительно промышленного производства и применения ЛГ и уверены, что в ближайшее десятилетие лазерные системы навигации и управления существенно потеснят на рынке традиционные системы.

III. Анализ зависимости смещения нуля ЛГ, от его параметров

1. Математическая модель ЛГ

Среди основных типов лазерных гироскопов (ЛГ), широко применяемых на практике, можно выделить прибор на основе кольцевого газового He-Ne-лазера с плоским 4-х зеркальным резонатором и с линейно поляризованным в сагиттальной плоскости излучением. Накачка лазера, работающего, как правило на длине волны, осуществляется разрядом постоянного тока по симметричной схеме: один катод - два анода.

ЛГ такого типа, установленные на виброподставку, могут использоваться, например, в качестве чувствительных элементов бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) для крупногабаритных самолетов гражданской авиации, совершающих маневры с малыми угловыми скоростями.

Для проектирования БИНС и компьютерного моделирования ее работы необходимо иметь математическую модель выходного сигнала вибрирующего ЛГ. Одной из составляющих этой модели является аналитическое выражение для выходной характеристики прибора. В теории ЛГ ее называют динамической частотной характеристикой, либо просто частотной характеристикой.

Частотная характеристика вибрирующего ЛГ определяется выражением

$$\frac{dN}{dt} = \frac{k_f}{2\pi} \omega_{beat} \quad (4)$$

где k_f - коэффициент "умножения частоты" ($k_f = 1, 2, 4, \dots$), реализуемый посредством оптоэлектронной системы съема и обработки информации; dN/dt - частота следования информационных импульсов N с выхода ЛГ; ω_{beat} - усредненная за период колебаний круговая частота биения встречных волн (ВВ). Частотная характеристика (4) определена, если известно выражение для ω_{beat} как

функции угловой скорости Ω вращения ЛГ, его внутренних параметров и параметров крутильных колебаний моноблока.

В состав ЛГ входят автоматические системы стабилизации периметра резонатора и токов разряда. Первая из них обеспечивает генерацию ЛГ на центре линии излучения, вторая - стабильность и одинаковое значение токов в плечах разряда. Общая работа этих систем обеспечивает заданный режим генерации ЛГ и устраняет влияние на точность прибора таких нежелательных факторов, как отстройка частоты и разбаланс токов.

Остаются, впрочем, еще и другие факторы, которые устранить нельзя и при мультипликативном взаимодействии, приводящие к дополнительным погрешностям ЛГ. К ним следует отнести обратное рассеяние и поглощение излучения на оптических элементах резонатора и неидентичность коэффициентов усиления ВВ., обусловленную неравнодобротностью резонатора. Учет этих двух факторов, а также количественный анализ их влияния на выходной сигнал ЛГ и составляют предмет данной статьи.

Для медленно вращающегося ЛГ при обязательном условии, что входящая в его состав автоматическая система вибрационного разнесения частот реализует с помощью специального алгоритма "ошумление" амплитуды колебаний моноблока и тем самым подавляет эффекты динамической синхронизации ВВ, зависимость $\omega_{beat} = \omega_{beat}(\Omega)$ необходимо представить в виде:

$$\omega_{beat} = K_0 + (1 + K_1)M\Omega + \sum_{j=2}^J K_j M^j \Omega^j \quad (5)$$

где K_0 , K_1 и $K_j (j = 2, \dots, J)$ - коэффициенты полиномиальной модели частотной характеристики вибрирующего ЛГ, которые обусловлены связью ВВ через обратное рассеяние на зеркалах его резонатора и неоднородно распределенные вдоль осевого контура потери; M - масштабный множитель. В идеальном ЛГ, в котором связь между ВВ отсутствует, коэффициенты K_0 , K_1 , K_j в (2) равны нулю

и $\omega_{beat} = M\Omega$.

Формулы для расчета нечетных коэффициентов K_1, K_3, K_5, \dots полинома (5) могут быть получены из работы . Особенность этих формул состоит в том., что они содержат коэффициенты связи волн не только во второй степени, но и в более высоких степенях.

2. Исходные соотношения

Согласно выражение для частоты биений ω_{beat} равномерно вращающегося ЛГ рассматриваемого типа имеет следующий вид:

$$\omega_{beat} = \left[1 - \frac{r_p^2}{2\omega^2} + \frac{r_m^2}{2(\alpha_m^2 + \omega^2)} \right] \omega +$$

$$D(r_2^2 - r_1^2) \left\{ -\frac{1}{\omega^2} + \frac{1}{\alpha_m^2 + \omega^2} \left[1 + \frac{\alpha_m(\alpha_p + \alpha_m)}{2(\alpha_p^2 + \omega^2)} \right] \right\} +$$

$$D\alpha_m r_1 r_2 \sin(\varepsilon_{12}) \frac{\alpha_p \alpha_m - \omega^2}{(\alpha_p^2 + \omega^2)(\alpha_m^2 + \omega^2)} \quad (\omega = M\Omega) \quad (6)$$

Выражение (6) получено в результате решения в приближении слабой связи ВВ системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику рассматриваемого ЛГ, которую на основании соотношений из работы[3] можно привести к известному из[3] виду

$$\dot{I}_1 = (\alpha_1 - \beta I_1 - \theta I_2) I_1 - 2r_2 (I_1 I_2)^{1/2} \cos(\psi + \varepsilon_2),$$

$$\dot{I}_2 = (\alpha_2 - \beta I_2 - \theta I_1) I_2 - 2r_1 (I_1 I_2)^{1/2} \cos(\psi - \varepsilon_1),$$

$$\dot{\psi} = \omega + r_2 (I_2 / I_1)^{1/2} \sin(\psi + \varepsilon_2) + r_1 (I_1 / I_2)^{1/2} \sin(\psi - \varepsilon_1) \quad (7)$$

где

$$\omega = M_g \Omega + \sigma_2 - \sigma_1 = M \Omega; M_g = \frac{8\pi A_0}{\lambda L} \quad (8)$$

$I_{1,2}, \psi, \dot{\psi}$ - безразмерные интенсивности, мгновенная разность фаз и мгновенная круговая частота биений ВВ; $\alpha_{1,2}, \beta, \theta$ - коэффициенты Лэмба, характеризующие соответственно превышение линейного усиления над потерями для каждой из ВВ, их самонасыщение и взаимное насыщение; $r_{1,2}$ и $\varepsilon_{1,2}$ - модули и аргументы комплексных интегральных коэффициентов связи ВВ через обратное рассеяние; ω - расщепление круговых частот встречных волн, обусловленное вращением ЛГ в инерциальном пространстве с угловой скоростью Ω и вычисленное без учета их связи; M_g - геометрический масштабный множитель ЛГ; A_0 - площадь, охватываемая осевым контуром; L - периметр осевого контура; λ - длина волны генерируемого излучения; $\sigma_{1,2}$ - коэффициенты Лэмба, определяющие малую поправку к геометрическому масштабному множителю; M - масштабный множитель ЛГ с учетом влияния активной среды.

Коэффициенты $\alpha_{1,2}$ в уравнениях для $I_{1,2}$ определяются выражениями

$$\alpha_{1,2} = \alpha \mp \delta \quad (9)$$

из которых следует $\alpha = (\alpha_2 + \alpha_1)/2$, $\delta = (\alpha_2 - \alpha_1)/2$.

Входящие в (6) параметры α_p, α_m рассчитываются по формулам

$$\alpha_p = \alpha, \alpha_p = \frac{\alpha_p(1 - h)}{1 + h} \quad (10)$$

где $h = \theta/\beta$, и представляют собой обратные времена релаксации интенсивностей ВВ соответственно, т.е.

$$\alpha_p = \frac{1}{T_{\alpha_p}}, \alpha_m = \frac{1}{T_{\alpha_m}} \quad (11)$$

где T_{α_p} и T_{α_m} - времена релаксации.

Малый безразмерный параметр D в (6) характеризует степень неодинаковости ВВ. Он определен соотношением

$$D = \frac{\delta}{\alpha_m}, (|D| \ll 1) \quad (12)$$

и в случае, когда причиной этой неодинаковости является неравнодобротность $\Delta Q/Q$ резонатора ЛГ, рассчитывается по формуле

$$D = \frac{\Delta Q}{Q} \frac{1+h}{1-h} \quad (13).$$

В выражении (6) фигурируют также параметры r_p и r_m , представляющие собой комбинации коэффициентов связи ВВ. Их можно рассчитать по формулам

$$\begin{aligned} r_p &= (r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos(\varepsilon_{12}))^{1/2}, \\ r_m &= (r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\varepsilon_{12}))^{1/2} \end{aligned} \quad (14)$$

где $\varepsilon_{12} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$.

3. Постановка задачи

Пусть закон крутильных колебаний моноблока ЛГ задан в виде

$$\nu(t) = A \sin(\sin(\nu t)) \quad (15)$$

где A и ν - средние за период колебаний амплитуда и круговая частота соответственно.

Из (15) следует выражение для угловой скорости $\Omega_{rel}(t)$ колебаний моноблока ЛГ:

$$\Omega_{rel}(t) = W \cos(\nu t) \quad (16)$$

где $W = \nu A$ - амплитуда относительной угловой скорости вибрации моноблока

ЛГ.

Для решения поставленной задачи необходимо на основе формулы (6) с учетом (16) получить выражения для расчета первых четырёх коэффициентов (K_0, K_1, K_2, K_3) полиномиальной модели (5) для Ω , малых по сравнению с амплитудой W .

4. Краткое описание методики расчета

С помощью тождественных преобразований выражение (6) для ω_{beat} можно привести к следующему виду:

$$\omega_{beat} = \left[1 - \frac{2r_1 r_2 \cos(\varepsilon_{12})}{\alpha_m^2 + \omega^2} - \frac{\alpha_m^2 R_p^2}{2\omega^2(\alpha_m^2 + \omega^2)} + \frac{D\alpha_m(\alpha_m + \alpha_p)(r_2^2 - r_1^2)}{2(\alpha_p^2 + \omega^2)(\alpha_m^2 + \omega^2)} \right] \omega + D\alpha_m r_1 r_2 \sin(\varepsilon_{12}) \frac{\alpha_p \alpha_m - \omega^2}{(\alpha_p^2 + \omega^2)(\alpha_m^2 + \omega^2)} \quad (17)$$

где $R_p^2 = r_p^2 + 2D(r_2^2 - r_1^2)$; $\omega = M\Omega$.

Второе, третье и четвёртое слагаемые в квадратных скобках (17) характеризуют поправки к масштабному множителю равномерно вращающегося ЛГ, обусловленные связью ВВ. Эти слагаемые сгруппированы по степени значимости - в порядке убывания. При больших Ω доминирующим является второе слагаемое, поскольку в его знаменателе содержится Ω^2 . Третье и четвёртое слагаемые содержат в знаменателе Ω^4 и поэтому имеют намного меньший удельный вес. Для ЛГ на вбродоподставке характерен как раз режим

вращений с большими угловыми скоростями. Учитывая это, упростим выражение (17), исключив из его состава малые величины. В результате получим

$$\omega_{beat} = \left(1 - \frac{2r_1 r_2 \cos(\varepsilon_{12})}{\alpha_m^2 + \omega^2} \right) \omega + D\alpha_m r_1 r_2 \sin(\varepsilon_{12}) \frac{\alpha_p \alpha_m - \omega^2}{(\alpha_p^2 + \omega^2)(\alpha_m^2 + \omega^2)}. \quad (18)$$

Уместно отметить, что из этой формулы при $D = 0$ и больших расщеплениях частот $\omega = M\Omega$ с очевидностью вытекает известное из работы[3] асимптотическое представление:

$$\omega_{beat} = \omega - \frac{2r_1 r_2 \cos(\varepsilon_{12})}{\omega} \quad (19)$$

проверенное экспериментально для широкого диапазона значений r_1, r_2 ; и. что существенно, для ε_{12} .

Следуя методологии работы, для решения сформулированной задачи применим квазистатический подход. Этот подход является приближенным и суть его сводится к следующему: за основу берется выражение для ω_{beat} справедливое для режима равномерного вращения ЛГ, однако затем это выражение подвергается процедуре усреднения за период $\tau = 2\pi/\nu$ колебаний моноблока прибора. Интуитивным основанием для использования такого подхода может служить условие малости времени релаксации $T_{\alpha_p}, T_{\alpha_m}$ по сравнению с периодом колебаний τ ; при выполнении этого условия лазерная система будет успевать отслеживать внешнее воздействие. Отметим, что на возможность использования квазистатического подхода для медленно вращающегося ЛГ на виброподставке указано также в работе[3].

Осуществим в (18) следующую подстановку:

$$\omega = M\Omega + \omega \cos(\nu t) \quad (20)$$

где $\omega = MW = M\nu A$ - амплитудное значение расщепления частот встречных волн ЛГ, обусловленное угловой вибрацией моноблока относительно корпуса прибора.

Затем, рассматривая случай малых угловых скоростей, разложим (18) в ряд по степеням Ω и ограничимся при этом его первыми четырьмя членами, которые усредним за период τ . В результате получим

$$\omega_{beat} = K_0 + (1 + K_1)M\Omega + K_2M^2\Omega^2 + K_3M^3\Omega^3 \quad (21)$$

где

$$K_0 = \frac{D\alpha_m r_1 r_2 \sin(\varepsilon_{12})}{\alpha_p - \alpha_m} \left[\frac{1}{(\alpha_m^2 + \omega^2)^{1/2}} - \frac{1}{(\alpha_p^2 + \omega^2)^{1/2}} \right] \quad (22)$$

$$K_1 = - \frac{2\alpha_m r_1 r_2 \sin(\varepsilon_{12})}{(\alpha_m^2 + \omega^2)^{3/2}} \quad (23)$$

$$K_2 = - \frac{\omega^6 D\alpha_m r_1 r_2 \sin(\varepsilon_{12})}{(\alpha_p - \alpha_m)(\alpha_p^2 + \omega^2)^2(\alpha_m^2 + \omega^2)^2} \times \\ \times \left[\frac{N_m}{(\alpha_m^2 + \omega^2)^{1/2}} - \frac{N_p}{(\alpha_p^2 + \omega^2)^2} \right] \quad (24)$$

$$K_3 = - \frac{(3\omega^2 - 2\alpha_m^2)\alpha_m r_1 r_2 \cos(\varepsilon_{12})}{(\alpha_m^2 + \omega^2)^{7/2}} \quad (25)$$

Параметры N_m, N_p в правой части (24) рассчитываются по формулам:

$$N_m = 1 + 2(\alpha_p^2 - \alpha_m^2)\omega^{-2} + \alpha_p^2(\alpha_p^2 - 4\alpha_m^2)\omega^{-4} - 2\alpha_p^4\alpha_m^2\omega^{-6} \quad (26)$$

$$N_p = 1 + 2(\alpha_m^2 - \alpha_p^2)\omega^{-2} + \alpha_m^2(\alpha_m^2 - 4\alpha_p^2)\omega^{-4} - 2\alpha_m^4\alpha_p^2\omega^{-6} \quad (27)$$

В выражении (21) коэффициент K_0 характеризует сдвиг нуля ЛГ, K_1 - поправку к масштабному множителю, а K_2 - некоммутируемую относительно угловой скорости составляющую частоты биений, которая зависит от Ω квадратично. Коэффициент K_3 характеризует коммутируемую относительно угловой частоты составляющую ω_{beat} , пропорциональную Ω^3 .

Четные коэффициенты K_0, K_2 полинома (21) обусловлены мультипликативным взаимодействием фактором неодинаковости усиления ВВ и их связи через обратное рассеяние. Нечетные коэффициенты K_1, K_3 обусловлены только одним из факторов.

Таким образом, совокупность формул (22)-(27) для расчета первых четырех коэффициентов полиномиальной модели (5) частотной характеристики (4) вибрирующего ЛГ представляет собой результат решения сформулированной задачи.

Наибольший интерес для нас представляет коэффициент K_0 , который как было сказано ранее характеризует сдвиг нуля. Исходя из соотношений приведенных в работах[2,4], окончательное выражение для сдвига нуля имеет вид:

$$\Omega_0 = \frac{D\alpha_m r_1 r_2 \sin(\varepsilon_{12})}{M(\alpha_p - \alpha_m)} \left[\frac{1}{(\alpha_m^2 + w^2)^{1/2}} - \frac{1}{(\alpha_p^2 + w^2)^{1/2}} \right] \quad (28)$$

отличаясь от (22) появившимся в знаменателе активным масштабным множителем M . Расчет проводим исходя из ранее упомянутых[2,4]. Опишем переменные данного уравнения:

$$w = MW = M\nu A \quad (29)$$

$$\alpha_p = (c/L)\Gamma(N_{rel} - 1) \quad (30)$$

$$\alpha_m = \alpha_p(1 - h)/(1 + h) \quad (31)$$

$$D = \Delta Q/Q(1 + h)(1 - h) \quad (32)$$

Здесь $w = M\nu A$ - амплитудное значение расщепления круговых частот встречных волн ЛГ вследствие угловой вибрации моноблока; α_p - обратное время релаксации суммы интенсивностей встречных волн (c - скорость света; Γ - суммарные резонаторные потери за один проход; N_{rel} - относительное превышение накачки своего порогового значения [2,3,4]); α_m - обратное время релаксации разности интенсивностей встречных волн; D - параметр, учитывающий фактор неравнодобротности $\Delta Q/Q$ резонатора ЛГ.

Величины α_m и D в (28) посредством параметра h ($h = \theta/\beta$) зависят от свойств активной среды, в частности, от суммарного давления p гелий-неоновой смеси. Согласно [4]

$$h = x_0[1 + x_0(p)F(\lambda_a)],$$

$$x_0(p) = 2\sqrt{\pi} \frac{\gamma_{ab}}{K_u} \exp\left(-\frac{\xi_{is}^2}{4}\right) \frac{\gamma_b}{\gamma_a + \gamma_b} \frac{\lambda_a}{1 - \lambda_a},$$

$$F(\lambda_a) = \frac{1}{\pi\xi_{is}^2} \exp\left(-\frac{\xi_{is}^2}{2}\right) \left(\frac{\gamma_a + \gamma_b}{\gamma_b}\right)^2 \left(\frac{1 - \lambda_a}{\lambda_a}\right)^2 - 1 \quad (33)$$

Здесь γ_a , γ_b , γ_{ab} - константы релаксации соответственно верхнего и нижнего лазерных состояний и лазерного перехода:

$$\gamma_a = \gamma_a^{(0)} + K_a p,$$

$$\gamma_b = \gamma_b^{(0)} + K_b p,$$

$$\gamma_{ab} = \gamma_{ab}^{(0)} + K_{ab} p \quad (34)$$

где $\gamma_a^{(0)}$, $\gamma_b^{(0)}$, $\gamma_{ab}^{(0)}$ - значения этих величин в приближении нулевого давления;

K_a , K_b , K_{ab} - коэффициенты линейной зависимости от давления [7]); λ_a - параметр

пленения резонансного излучения; $\varepsilon_{is} = \Delta_{is}/K_u$ - нормированный на параметр доплеровской ширины линии K_u изотопический сдвиг Δ_{is} частоты лазерного перехода.

Для варианта геометрии резонатора рассматриваемого ЛГ выражение для комбинаций коэффициентов связи $r_1 r_2 \sin(\varepsilon_{12})$ входящее в (28), можно записать в виде:

$$r_1 r_2 \sin(\varepsilon_{12}) = 4(c/L)^2 \times \{ (a_f^2 + a_s^2) \sin 2\chi + 2(a_f b_f + a_s b_s) \cos \chi + 2[a_f a_s \sin 2\chi + (a_f b_s + a_s b_f) \cos \chi] \cos 2\phi \} \quad (35).$$

Рассмотрим ЛГ с квадратным четырехзеркальным резонатором с длиной плеча $l = 5$ см. Резонатор образован двумя плоскими сигнальными зеркалами и двумя установленными на пьезокорректорах смежными сферическими зеркалами радиуса кривизны K . Даны значения:

- интегральный коэффициент светорассеяния в полный телесный угол:

$$K_{\text{scat}} = 100 \times 10^{-6}, 10 \times 10^{-6};$$

- активный масштабный множитель, учитывающий свойства усиливающей среды: $M = 496459$;

- угол $\phi = 0^\circ$;

- изотопический сдвиг частоты лазерного перехода: $\Delta_{is} = 2\pi 875 \times 10^6 \text{ c}^{-1}$;

- параметр доплеровской ширины линии: $K_u = 2\pi 910 \times 10^6 \text{ c}^{-1}$;

- константы релаксации соответственно верхнего и нижнего лазерных состояний и лазерного перехода в приближении нулевого давления:

$$\gamma_a^{(0)} = 2\pi 17.4 \times 10^6 \text{ c}^{-1}, \gamma_b^{(0)} = 2\pi 10.3 \times 10^6 \text{ c}^{-1}, \gamma_{ab}^{(0)} = 2\pi 13.8 \times 10^6 \text{ c}^{-1};$$

- коэффициенты линейной зависимости от давления: $K_a = 2\pi 3.9 \times 10^6 \frac{1}{\text{c} \cdot \text{Tor}}$,

$$K_b = 2\pi 7.5 \times 10^6 \frac{1}{\text{c} \cdot \text{Tor}}, K_{ab} = 2\pi 60 \times 10^6 \frac{1}{\text{c} \cdot \text{Tor}};$$

- параметр пленения резонансного излучения: $\lambda_a = 0.59$;

- скорость света: $c = 2.9979 \times 10^8$ м/с;

- периметр осевого контура резонатора: $L = 20$ см;

- эффективные углы дифракционной расходимости излучения в сечениях,

где расположены плоские и сферические зеркала: $\theta_f = 207''$, $\theta_s = 205''$;

- модули локальных комплексных безразмерных коэффициентов связи встречных волн через поглощение и пропускание на плоских зеркалах: $b_f = 1.13 \times 10^{-8}$;

- модули локальных комплексных безразмерных коэффициентов связи встречных волн через поглощение на сферических зеркалах: $b_s = 3.72 \times 10^{-9}$;

- угол потерь на рассеяние: $\chi = 0.31^\circ$;

- суммарные резонаторные потери за один проход: $\Gamma = 400 \times 10^{-6}$.

Наша задача рассмотреть влияние параметров вибрирующего ЛГ на смещение нуля, исходными параметрами для нас являются:

○ давление He-Ne смеси: $p = 6.5(Top)$;

○ амплитуда колебаний моноблока: $A = 120(угл.с)$;

○ круговая частота колебаний моноблока: $\nu = 350(Гц)$;

○ неравнодобротность резонатора ЛГ: $\Delta Q/Q = 0.01$;

○ относительное превышение накачкой своего значения: $N_{rel} = 1.3$;

а пределы их изменения заданы:

○ $p \in [2; 6.5](Top)$;

○ $A \in [60; 200](угл.с)$;

○ $\nu \in [300; 500](Гц)$;

○ $\Delta Q/Q \in [0; 0.05]$;

○ $N_{rel} \in [1; 2.5]$.

5. Программная реализация в Octave

Для решения поставленной задачи, была разработана модульная программа на языке Octave. Octave представляет собой язык компьютерной математики подобный широко распространенному в Украине пакету Matlab компании MathWorks. Программа написанная для Octave может быть без трудностей перенесена в Matlab и наоборот. Достоинствами данного пакета есть его свободная распространяемость, доступность большого числа функций и описанная выше совместимость с популярным программным продуктом.

Алгоритм работы основан на теоретической части данного исследования. Программа состоит из двух частей (файлов): файл *"plot_lg_parm.m"* - это основная программа, в ней заданы переменные определяющие параметры гироскопа влияние которых на сдвиг нуля нужно исследовать, и производится печать полученных графиков в формат PNG (Portable Network Graphics). Вычисление значений производится путем вызова функции *Omega_0* с передачей ей соответствующих параметров. *Omega_0* определена во втором файле программы - *"Omega_0.m"*. В теле функции заданы в виде переменных остальные значения из условия и выражения (28)-(35), с помощью которых производится расчет. Также осуществляется преобразование некоторых переменных к размерностям, которые используются в расчетных формулах, и обратное преобразование Ω_0 из рад/с в град/ч которые более удобны для графического представления. Оба файла подробно прокомментированы (см. Приложение А). После запуска программы в текущей директории появляются файлы графиков зависимостей. При написании кода использовалась Octave 2.1.71, с более ранними версиями программа не тестировалась. Для корректной работы необходимо, чтобы оба файла находились в одной директории.