

УДК 629.7.054.07
EDN BWSTOV

С. А. БОЛОТНОВ, С. И. НАЗАРОВ, А. О. СИНЕЛЬНИКОВ, Н. В. ТИХМЕНЕВ, А. А. УШАНОВ

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ ПРИ АКТИВНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПЕРИМЕТРА

В работе рассматривается активная стабилизация периметра лазерного гироскопа в широком температурном диапазоне с помощью подвижного зеркала, снабженного пьезокерамическим приводом. Выполнен анализ основных конструкций пьезокорректоров, применяемых в отечественных лазерных гироскопах. Построены компьютерные модели пьезокорректоров, позволяющие изучать перекосы и искривления поверхностей пьезозеркал по их резонансным колебательным характеристикам. Путем сравнения расчетных данных и результатов эксперимента установлена связь между движениями зеркал и выходными параметрами лазерных гироскопов. Предложены возможные доработки конструкций пьезокорректоров, позволяющие повысить точностные и эксплуатационные характеристики лазерных гироскопов.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, пьезокорректор, пьезозеркало, пьезоблок, резонансные колебания, типы колебаний, моды, суммарные потери энергии в резонаторе, дифракционные потери, модель погрешностей, система регулировки периметра.

Болотнов Сергей Альбертович. Кандидат технических наук, доцент, главный специалист, Государственный научно-исследовательский институт приборостроения (Москва).

Назаров Сергей Иванович. Аспирант, техник первой категории, Государственный научно-исследовательский институт приборостроения. ORCID 0000-0002-2452-9457.

Синельников Антон Олегович. Кандидат технических наук, начальник лаборатории, Государственный научно-исследовательский институт приборостроения; доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, Российский университет дружбы народов (Москва). Член секции молодых ученых международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». ORCID 0000-0002-5579-3509.

Тихменев Николай Вадимович. Кандидат физико-математических наук, начальник отдела, Государственный научно-исследовательский институт приборостроения.

Ушанов Александр Александрович. Аспирант, ведущий инженер-электроник, Государственный научно-исследовательский институт приборостроения. ORCID 0009-0009-3703-9981.

Введение

В настоящий момент в качестве датчиков угловых перемещений для автономных инерциальных навигационных систем (ИНС) [1–5] и систем краткосрочной навигации в основном используются *He-Ne* лазерные гироскопы (ЛГ) с дрейфом нуля 0,05–0,001 °/ч. Несмотря на предшествующие неблагоприятные прогнозы, область применения ЛГ только расширяется [4, 6, 7]. Важнейшие научные результаты были получены в 70–90-х годах [8–11], однако исследования, направленные на дальнейшее повышение точностных и эксплуатационных характеристик ЛГ, продолжаются, и некоторые направления исследований остаются актуальными [12–19].

В настоящее время ведущие производители выпускают ЛГ, точность которых составляет несколько тысячных градуса в час. Улучшение параметров и повышение качества ЛГ достигаются за счет совершенствования технологии, снижения себестоимости и уменьшения габаритных размеров резонатора кольцевого лазера (КЛ). Передовую позицию здесь занимает фирма *Honeywell* (США), обеспечивающая стабильность смещения нуля до 0,003 °/ч на приборах типа *GG-1320* с трехзеркальным резонатором и периметром КЛ $L = 15,2$ см.

Хорошо известно, что длину резонатора КЛ надо поддерживать постоянной ($L = L_0 = const$) и кратной целому числу длин волн генерации, которая для *He-Ne* лазера составляет $\lambda = 0,633$ мкм [10]. Для этой цели в ЛГ используется система регулировки периметра (СРП) с исполнительным элементом, представляющим собой одно или два подвижных зеркала, снабженных пьезокерамическим приводом. Изменение линейных размеров резонатора может происходить под действием внешней температуры и самопрогрева лазера [20, 21]. К самопрогреву приводят тлеющий разряд постоянного тока, создающий лазерную генерацию, и выделение тепла другими электронными системами, обеспечивающими функционирование ЛГ [22, 23].

На рис. 1 показана схема температурной деформации осевого контура ЛГ с магнитооптической частотной подставкой на эффекте Зеемана (зеemanовский ЛГ) при активной стабилизации периметра с помощью подвижных зеркал [24].

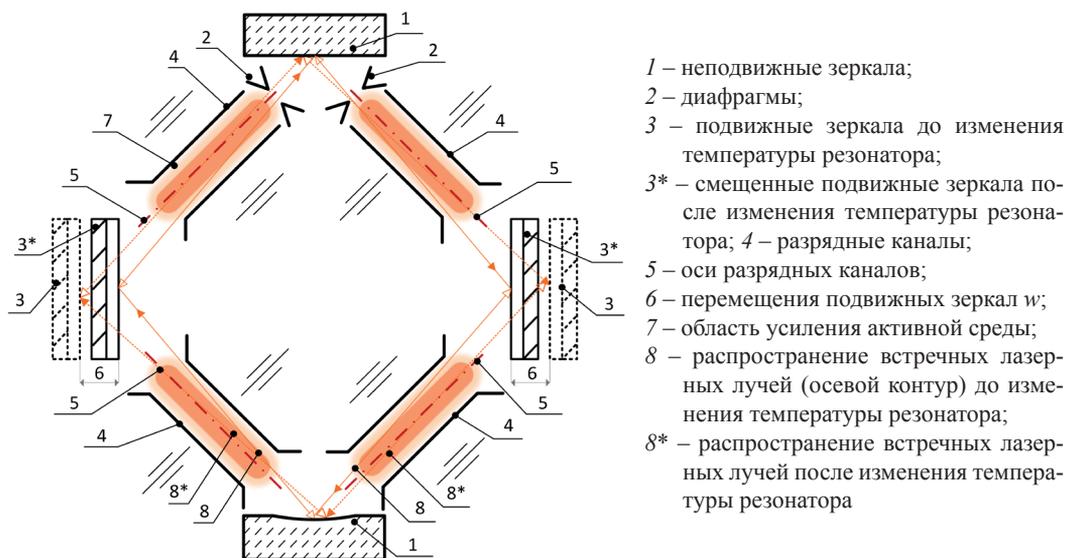


Рис. 1. Схема температурной деформации осевого контура зеemanовского ЛГ

Из рис. 1 видно, что при компенсации теплового расширения резонатора подвижными зеркалами изменяется положение осевого контура оптического резонатора относительно диафрагмы и осей разрядных каналов. Это приводит к изменению величины смещения нуля ЛГ, вызываемому дифракционным и ленгмюровским дрейфами [12, 22].

Причинами смещения нуля в газовых лазерах могут быть различные физические явления [10–13, 22], но его стабильность в основном определяется суммарными потерями в резонаторе и неоднородностью усиления активной среды [25]. Эти параметры, в свою очередь, зависят от расположения оптического осевого контура относительно внутренних элементов лазера.

При активной стабилизации длины резонатора КЛ за счет перемещения подвижных зеркал (3) происходит изменение положения его осевого контура (8) относительно центра диафрагм (2) и осей разрядных каналов (5), вследствие чего изменяются дифракционные потери резонатора и происходит усиление активной среды.

Для минимизации указанных выше перемещений моноблок КЛ [10, 11, 17, 26–28] изготавливают из стеклокерамики с минимальным температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) [26–30]. На сегодняшний день ТКЛР используемых материалов приближается к предельно достижимым значениям [30] и ожидать его качественного уменьшения не приходится.

Изменение периметра КЛ при температурных воздействиях может составлять $L = L_0 \pm 3\lambda$ [29, 31]. Это вызывает неконтролируемые деформации резонатора, а также смещение и перекосы отражающих поверхностей зеркал, что приводит к разъюстировке оптического контура. Наличие дополнительных конструктивных элементов, а также неоднородное распределение температуры по объему резонатора усиливает указанную проблему. Таким образом, исследования в области оптимизации геометрии пьезокорректора (ПК) остаются актуальными [32, 33].

Ведутся работы по пассивной стабилизации периметра КЛ путем введения в конструкцию ПК механизма компенсации его теплового расширения [34–36] за счет управляемого встречного прогиба мембраны пьезозеркала. Такие термокомпенсированные системы позволяют уменьшить управляющее напряжение и расширить суммарный диапазон перемещения отражающей поверхности подвижных зеркал. Тем не менее проблема деформаций и перекосов при этом сохраняется.

Известны методы, позволяющие рассчитать сдвиг осевого контура вследствие смещений и искривлений зеркал [37, 38] и связанных с ним дифракционных потерь и селекции мод резонатора [38–40]. Известно также, что с прохождением луча по центру диафрагмы чувствительность резонаторных потерь к перемещениям отражателей снижается [38].

Таким образом, для лазерной гироскопии остается актуальной разработка технического решения, обеспечивающего прецизионное (на единицы нанометров) перемещение отражающей поверхности пьезозеркал, в котором отсутствовали бы перекосы и нарушения плоскостности, приводящие к неконтролируемому смещению оптического контура КЛ. Поиск такого решения должен строиться на результатах анализа существующих конструкций пьезокорректора в целом, включая подложку зеркала, пьезопровод и их соединение.

В рамках настоящей работы выработаны рекомендации по оптимизации конструкции пьезокорректоров для повышения точностных и эксплуатационных характеристик отечественных ЛГ.

Работа содержит следующие основные разделы:

- анализ особенностей основных массово применяемых в России конструкций ПК;
- моделирование движения отражающей поверхности пьезозеркал при активной стабилизации периметра ЛГ;
- экспериментальные исследования амплитудно-частотной характеристики пьезокорректоров (АЧХ);
- экспериментальное исследование влияния работы ПК на параметры ЛГ;
- заключение, в котором обсуждаются полученные результаты, приводятся выводы и практические рекомендации.

Анализ особенностей конструкций пьезокорректоров

На рис. 2 приведены две наиболее распространенные конструктивные схемы пьезокорректоров – ПК1 и ПК2 (рис. 2, а и б соответственно), применяемые для активной стабилизации периметра в наиболее распространенных ЛГ российского производства [14, 15].

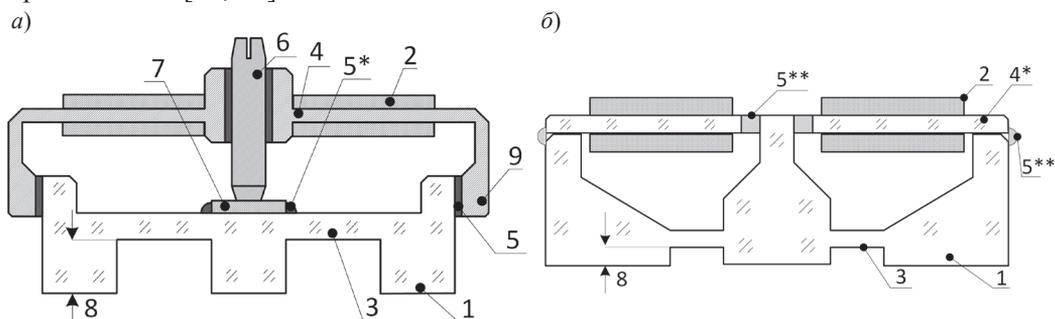


Рис. 2. Основные конструктивные схемы отечественных ПК:

- 1 – подложки зеркал; 2 – кольцевые пьезоэлектрические элементы;
 3 – прогибающиеся мембраны пьезозеркал;
 4 – прогибающиеся мембраны пьезопроводов (4 – металлическая, 4* – ситалловая);
 5 – соединения пьезоблока с пьезозеркалом
 (5 – твердые клеевые, 5* – мягкие клеевые, 5** – мягкие паяные);
 6 – толкающий винт, создающий начальный натяг;
 7 – металлический диск, передающий усилие от винта 6 на мембрану пьезозеркала 4;
 8 – глубина размещения мембраны p ; 9 – «лапка»

Представленный на рис. 2, а ПК1 используется в большинстве известных зарубежных и отечественных ЛГ на виброподвесе [14]. Все показанные соединения в ПК1 выполнены с помощью твердого эпоксидного клея. Далее в компьютерной модели эти соединения принимаются абсолютно жесткими, без учета свойств клея.

На рис. 2, б показан ПК2, применяемый в земановских ЛГ [15]. Все показанные соединения в ПК2 выполнены с помощью мягкого оловянно-свинцового припоя. Мягкость или жесткость соединения оценивается по сравнению с соединяемыми материалами, а именно со стеклокерамикой типа оптического ситалла СО-115М, из которой изготавливаются корпус и зеркала резонатора КЛ, и металлами типа инвара Н36, задействованными в обеих конструкциях ПК.

Основным отличием исследуемых пьезокорректоров является то, что ПК1 имеет всегда напряженное рабочее положение. Как видно из рис. 2, а, в ПК1 мембрана про-

гибается за счет толкающего усилия при отсутствии сил, действующих в обратном направлении. Винт 6 создает постоянный прогиб мембраны 3, чтобы обеспечить необходимое для работы СРП возвратно-поступательное движение подложки подвижного зеркала 1. При этом мембрана находится в напряженном состоянии в течении всего срока службы прибора. Напротив, конструкция ПК2 позволяет зеркалу перемещаться в обоих направлениях и не предусматривает постоянной упругой деформации мембраны. Такое техническое решение является очевидным преимуществом ПК2.

Другая важная конструктивная особенность любых ПК – различные температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) подложки зеркала и размещенного на ней пьезоблока. В ПК2 за счет разницы ТКЛР пьезокерамических элементов 2 пьезоблок имеет в радиальном направлении коэффициент расширения больший, чем ситалловая подложка пьезозеркала 1 [41]. Чтобы это не приводило к дополнительному зависящему от температуры искривлению отражающей поверхности зеркала, используют пластичные паяные соединения 5* между пьезоблоком и подложкой зеркала. В ПК1 тот же эффект достигается за счет упругости протяженных «лапок» 9.

Моделирование движения отражающей поверхности пьезозеркал при активной стабилизации периметра ЛГ

Рассмотрим движение отражающих поверхностей пьезозеркал при активной стабилизации периметра КЛ. Исследование движения отражающей поверхности пьезозеркал может быть выполнено с привлечением трехмерных моделей ПК в программной среде ANSYS. Построение модели ПК и моделирование ее движения с помощью метода конечных элементов позволяет выявить искривление отражающей поверхности зеркала и рассчитать изменение радиуса кривизны R_r этой поверхности. На рис. 3 для ПК2 представлены расчетные значения радиуса кривизны поверхности зеркала R_r в зависимости от углубления мембраны p .

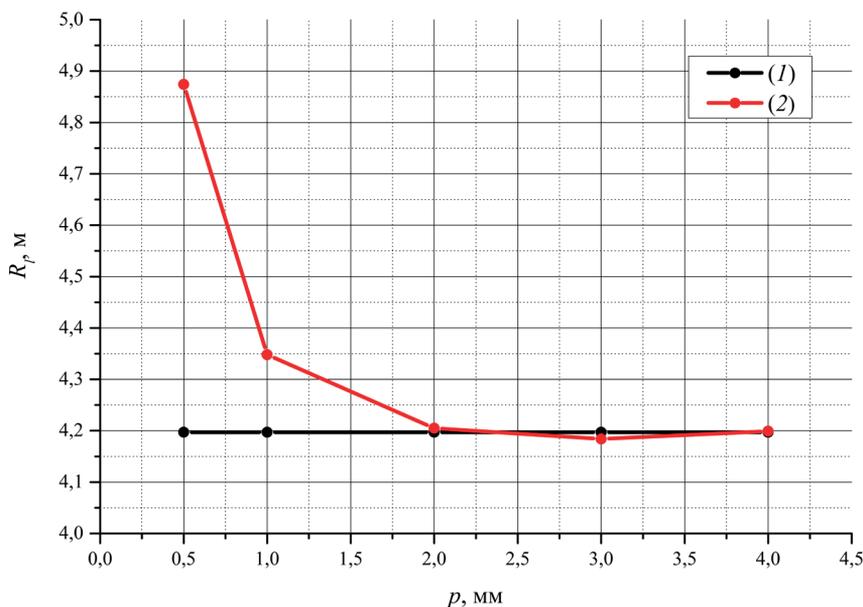


Рис. 3. Изменение радиуса кривизны сферического зеркала: 1 – при постоянном периметре ($L = L_0 = const$); 2 – при уменьшении периметра на длину волны смещением пьезозеркала ($L = L_0 - \lambda$)

Видно, что при малом углублении мембраны $p = 0,5-1$ мм изменение периметра КЛ на длину волны ($L = L_0 - \lambda$) приводит к изменению R_l до 15%. При больших заглублениях мембраны данная зависимость пропадает. Следовательно, заглубление мембраны $p \geq 3$ мм достаточно для того, чтобы отражающая поверхность не искривлялась при движении центральной части пьезозеркала.

Определение величины перекосов расчетным путем затруднено, поскольку асимметрия конструкции не может быть определена из конструкторских допусков с приемлемой достоверностью. Одним из возможных решений является исследование конструкции пьезокорректоров с помощью компьютерного моделирования колебательных (резонансных) характеристик. С этой целью в программной среде ANSYS были рассчитаны собственные частоты и формы механических колебаний двух конструкций ПК. На рис. 4 и 5 показаны типы колебаний (моды) и резонансные частоты ПК1 и ПК2 соответственно.

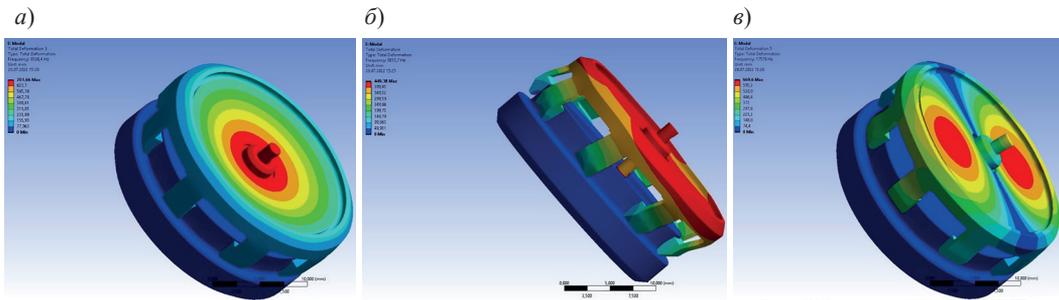


Рис. 4. Типы колебаний ПК1:

- a) $f = 9325$ Гц – возвратно-поступательное движение: основная четная мода;
- б) $f = 9250$ Гц – боковые смещения пьезоблока из-за проскальзывания винта по диску: паразитные моды;
- в) $f = 17600$ Гц – прогиб мембран без смещения винта: паразитные нечетные моды

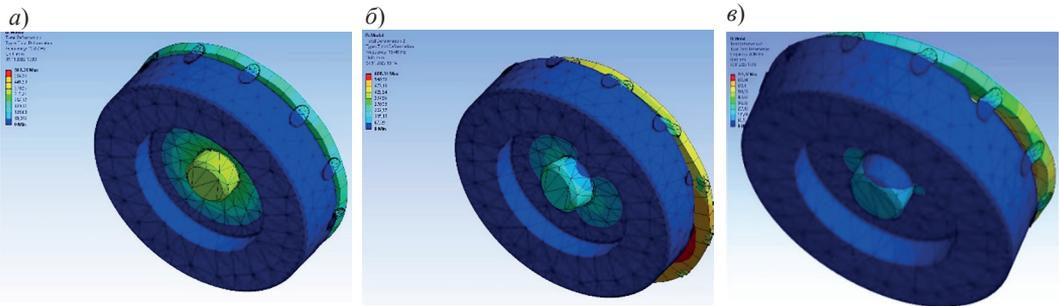


Рис. 5. Типы колебаний ПК2:

- a) $f = 15522$ Гц – возвратно-поступательное движение: основная четная мода;
- б) $f = 16741$ Гц – прогиб мембран со смещением пьезоблока: паразитные нечетные моды;
- в) $f = 20064$ Гц – прогиб мембран со смещением и прогибом пьезоблока: паразитные нечетные моды

На рис. 4, а и 5, а показаны основные моды нулевого порядка ПК, которые соответствуют возвратно-поступательному движению отражающей поверхности пьезозеркал. При этом типе движений происходит изменение периметра L без дополнительных неконтролируемых деформаций оптического контура. Здесь мы рассматриваем только прогиб мембран пьезозеркала и пьезоблока. Углубление мембраны принимаем достаточно большим ($p > 3$ мм), чтобы центральная часть зеркала с

покрытием не деформировалась (см. рис. 3). Возникающие на этих модах перемещения отражающей поверхности зеркала w совпадают по направлению с задаваемой пьезоприводом вынуждающей силой F , которая является центрально симметричной четной функцией, подобной дельта функции. При моделировании воздействия вынуждающая сила F действует по оси ПК и имеет вид:

$$F(r = 0) = F_0, F(r > 0) = 0,$$

где r – радиус-вектор в полярной системе координат с началом в геометрическом центре ПК.

Перемещения поверхности зеркала и мембран на основной моде также являются центрально симметричными четными функциями. Перекосы центральной части зеркала при возбуждении таких колебаний не возникают. На рис. 4, б, в и 5, б, в показаны построенные в среде *ANSYS* модели мод более высокого (первого) порядка с нечетным распределением прогиба мембраны. Виды прогибов в одномерном варианте схематично представлены на рис. 6.

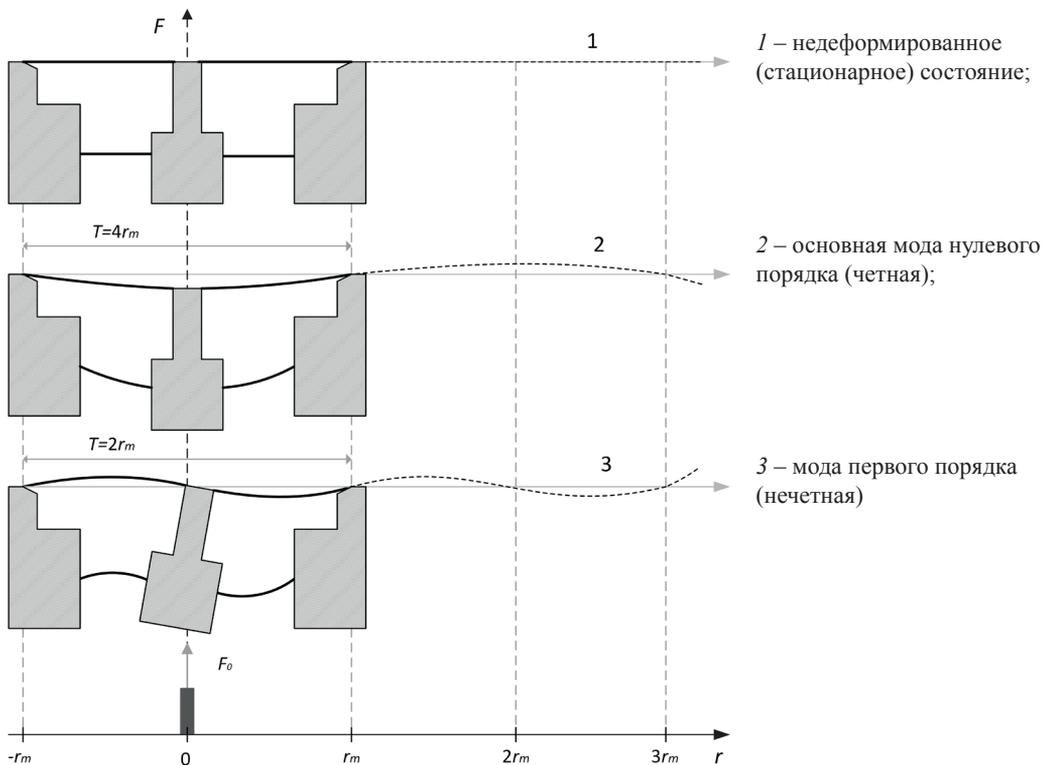


Рис. 6. Схемы типов колебаний пьезокерамики

Прогибы мембран описываются периодическими функциями с пространственными периодами $T = 2r_m$ для нулевой моды и $T = r_m$ для моды первого порядка, где r_m – радиус зеркала. Моды, имеющие порядок выше первого, рассматривать нет смысла, поскольку распределения их амплитуд в точке $r = 0$ (рис. 6) повторяют либо нулевую, либо первую моды.

Как известно [42, 43], для возбуждения резонансных колебаний необходимо не только совпадение частот воздействующей силы и собственной частоты колебаний (моды),

но и пространственного распределения воздействия и амплитуды собственных колебаний. Это явление наглядно приводится в [43] и математически описывается интегралом произведения распределений амплитуд моды и вынуждающей силы в области их взаимодействия. Данный интеграл будет равен нулю для нечетных мод колебаний и рассматриваемой четной вынуждающей силы, поскольку эти функции ортогональны. Возбуждение нечетной моды возможно только при нарушении четности функции распределения вынуждающей силы либо при нарушении нечетности собственной моды.

На практике возможны оба случая. Например, при смещении относительно центра ПК1 винта, задающего начальный натяг мембран пьезоблока и пьезозеркала, есть вероятность смещения диска относительно центра пьезозеркала и неравномерного распределения клея, соединяющего мембрану пьезоблока с пьезоэлементами, и так далее. Описанные причины обуславливают угловое перемещение отражающей поверхности зеркала (перекос) не только при резонансных колебаниях, но и при медленных смещениях поверхности зеркала под давлением пьезопривода.

Экспериментальные исследования амплитудно-частотной характеристики пьезокорректоров

Сравним результаты расчета резонансных режимов работы ПК, полученные методами компьютерного моделирования, и их наблюдаемые экспериментально амплитудно-частотные характеристики (АЧХ).

Простая и информативная методика определения АЧХ состоит в следующем. Пьезоблок содержит два пьезокерамических элемента. На один из них подают переменное напряжение U_1 от генератора со сканирующей частотой, тем самым за счет обратного пьезоэффекта задают механические колебания пьезокорректора. На втором пьезоэлементе регистрируют напряжение U_2 , пропорциональное амплитуде механических колебаний отражающей поверхности пьезозеркала. Зарегистрировать возникновение перекосов отражающей поверхности можно по наличию побочных резонансных пиков на амплитудно-частотной характеристике. В рабочем частотном диапазоне (до ~20 КГц) ПК должен иметь место один резонансный пик, соответствующий основной нулевой моде. Пики, соответствующие четным модам высших порядков, возникают на частотах выше 30 КГц и не представляют интереса.

На рис. 7, *а* и *б* представлены экспериментально полученные осциллограммы АЧХ для ПК1 и ПК2 соответственно. Измерения АЧХ проводились на нескольких образцах ПК обоих типов. На большинстве исследованных образцов ПК2 наблюдался единственный ярко выраженный пик, и АЧХ имела слабые искажения в виде побочных пиков, величина которых не превышает 5-7% пикового значения основной моды. АЧХ ПК1 во всех случаях содержала один или два побочных пика, амплитуды которых сравнимы с амплитудой пика основной моды. В таблице приведены измеренные значения резонансных частот f и относительных амплитуд A первых трех мод ПК1. Видно, что относительная амплитуда побочной моды A_{10} достигала 75% (образец №5).

Исследования конструкции пьезокорректоров показывают важность правильного выбора и оптимизации практически всех геометрических размеров данного устройства [33–36]. Повышенная вероятность возникновения перекосов в ПК1 связана с наличием протяженных упругих «лапок», представленных на рис. 2, *а* [36]. При такой конструкции возникает боковое смещение пьезоблока относительно подложки

пьезо зеркала, приводящее к смещению точки касания толкающего винта относительно центра пьезо зеркала (асимметрии вынуждающей силы F) и перекосу отражающей поверхности. Это смещение ограничено только трением между центральным винтом и центральным металлическим диском. Компьютерное моделирование, а также результаты экспериментального исследования показывают, что при величине коэффициента трения около 0,1-0,3 расчетная резонансная частота побочных мод оказывается меньше частоты основного типа колебаний.

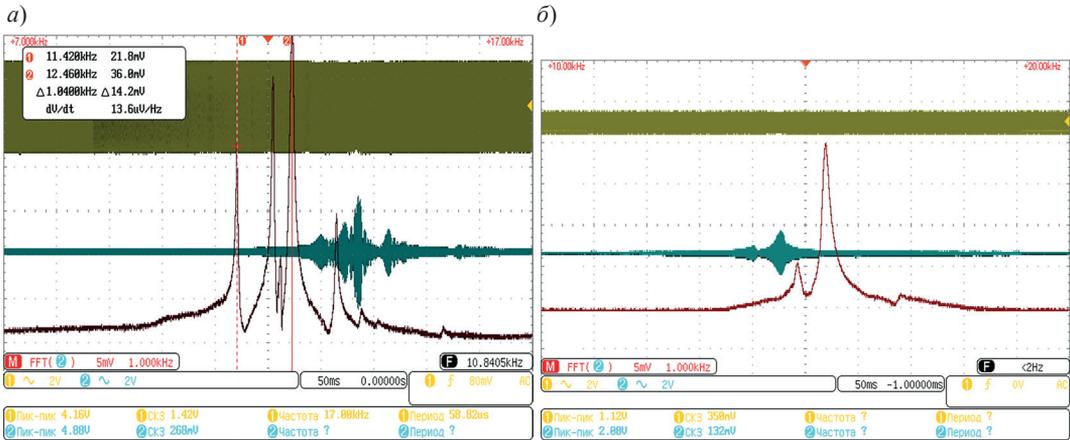


Рис. 7. Осциллограммы АЧХ пьезокорректоров:
 а) типичная осциллограмма для ПК1; б) типичная осциллограмма для ПК2

Таблица 1

Резонансные частоты собственных колебаний ПК

Номер ПК1	Резонансные частоты f , кГц			Относительная амплитуда A , %		
	f_{01}	f_{10}	f_{00}	A_{01}	A_{10}	A_{00}
1	–	11,62	12,04	–	52,69	100,00
2	11,33	11,67	12,00	43,95	43,15	100,00
3	11,41	12,09	12,45	45,29	68,24	100,00
4	11,42	12,09	12,46	27,78	61,11	100,00
5	11,60	12,50	12,97	21,67	76,39	100,00
6	11,62	12,53	12,95	8,36	54,33	100,00

Перекося отражающей поверхности зеркала приводит к смещениям осевого контура резонатора КЛ, изменению положения лазерного луча относительно оси диафрагмы и, следовательно, изменению дифракционных потерь. Изменение потерь резонатора влияет на уровень усиления и интенсивность генерации I . Характерные зависимости интенсивности излучения КЛ при изменении периметра $I(L)$ путем задания управляющего напряжения пьезопривода приведены на рис. 8.

Следует отметить, что зависимости $I(L)$ для разных образцов лазеров значительно отличаются, причем случайным образом. Кроме того, интенсивность может как

убывать, так и возрастать при движении зеркала в одном направлении, например внутрь оптического контура КЛ.

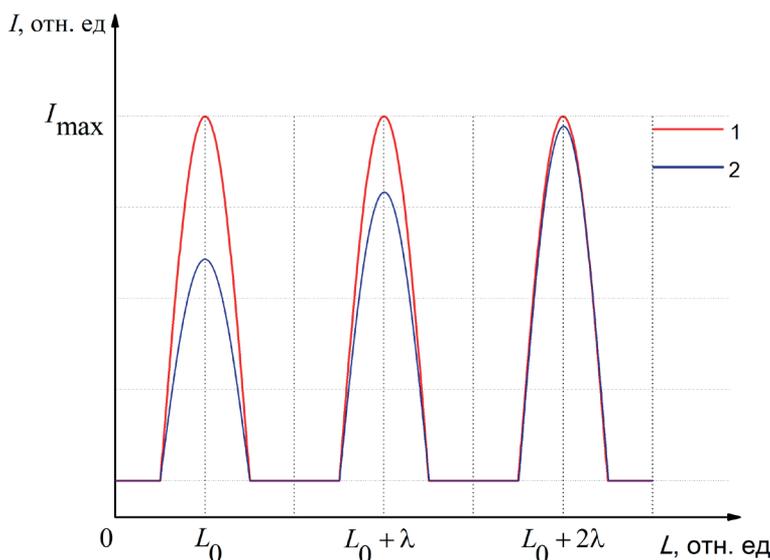


Рис. 8. Зависимость выходной интенсивности излучения КЛ от изменения длины периметра ПК:
 1 – слабая зависимость интенсивности от сканирования ПК;
 2 – сильная зависимость интенсивности от сканирования ПК

Известно [38–40], что степень зависимости дифракционных потерь от смещения луча по диафрагме обусловлена начальным положением луча относительно центра диафрагмы, другими словами, от точности юстировки резонатора. Чем выше начальные дифракционные потери, тем больше изменение этих потерь при одинаковом смещении луча по диафрагме. Перекосы могут значительно различаться для каждого конкретного образца ПК. Следовательно, потери в резонаторе КЛ зависят от двух факторов: точности юстировки и перекосов зеркала. Исключение влияния любого из них приведет к повышению точностных характеристик ЛГ, в том числе стабильности смещения нуля. Способ юстировки и точность ее выполнения определяются уровнем технологии [44–46], и заметного улучшения здесь не ожидается. Ввиду этого уменьшение перекосов и деформаций поверхности пьезо зеркала является ключевым фактором повышения точности ЛГ.

В ПК2 компенсация расширения пьезоблока происходит за счет упругой деформации мягкого припоя. Таким образом упрощается конструкция и исключаются перекосы центра зеркала, вызванные неидеальной симметрией пьезоблока. Кроме того, конструкция ПК2 обеспечивает не допускающую бокового сдвига центровку пьезоблока относительно зеркала с точной привязкой точки приложения силы F к геометрическому центру пьезо зеркала.

Расчет резонансов компьютерной модели показывает отсутствие низкочастотных колебаний при использовании характеристик припоя, соответствующих реальному материалу, применяемому в конструкции ПК2. Перекосы в этом случае маловероятны, что подтверждается также экспериментальными исследованиями АЧХ и результатами независимых работ. В частности, в [32] на большом числе образцов зеркал экспериментально показано, что угловые перекосы ПК2 не превышают 3,5''.

Экспериментальное исследование влияния работы пьезокорректоров на параметры ЛГ

Рассмотрим влияние работы ПК на параметры генерации излучения в КЛ на примере зеэмановского ЛГ. В силу особенностей оптико-физической схемы [8, 15] зеэмановский ЛГ является удобным инструментом для фундаментальных исследований с возможностью прецизионного контроля изменения потерь оптического резонатора КЛ по частоте зеэмановских биений Δf [16, 50]. В ЛГ на виброподвесе точность аналогичного контроля потерь по интенсивности излучения существенно ниже.

Экспериментальным путем было установлено, что на всех образцах зеэмановских ЛГ уменьшение потерь всегда связано с одним и тем же направлением движения зеркала. При движении зеркала наружу и прогибе мембраны в направлении пьезоблока (см. рис. 1), соответствующем тянущему усилию пьезопривода, потери уменьшались, а интенсивность излучения возрастала (см. рис. 8, зависимость 2). В свою очередь, увеличение потерь наблюдалось при толкающем усилии пьезопривода, то есть при прогибе зеркала внутрь резонатора. Функция потерь резонатора связана с деформацией отражающей поверхности зеркала под действием пьезопривода. Очевидно, что тянущее движение пьезопривода приводит к уменьшению радиуса кривизны зеркала R_p , а толкающее движение – к его увеличению. Приведенная выше компьютерная модель позволяет рассчитать изменения параметров при изменениях радиуса кривизны сферического зеркала (см. рис. 3).

Юстировка КЛ осуществляется методом многолучевой интерференции, который описан в [44–46]. Качество изготовления зеркал и точность выполнения корпусов резонаторов КЛ определяют суммарные потери энергии и относительную селективность C_s поперечных электромагнитных мод (ТЕМ) (различающихся как по частоте, так и по интенсивности распределения в гауссовом пучке) согласно следующему соотношению:

$$C_s = (\sigma_{01} - \sigma_{00}) / \sigma_{00}, \quad (1)$$

где σ_{00} – потери резонатора на основной моде ТЕМ₀₀, $\sigma_{01} = \sigma_{10}$ – потери резонатора на первых поперечных модах ТЕМ₀₁ и ТЕМ₁₀ (одинаковые в неплюском резонаторе зеэмановского ЛГ) [31].

Степень зависимости характеристики, описывающей уровень дифракционных потерь α , от диаметра диафрагмы d быстро нарастает [38–40] при уменьшении геометрических размеров диафрагмы по отношению к диаметру гауссова пучка либо при увеличении диаметра пучка при постоянной диафрагме. Зависимость $\alpha(d)$ при фиксированном радиусе кривизны R сферического зеркала в симметричном неплюском резонаторе зеэмановского КЛ представлена на рис. 9.

Из рис. 9 видно, что при фиксированном d рост α связан с разностью потерь $\Delta\alpha$ мод ТЕМ₀₁ и ТЕМ₀₀ или относительной селективностью C_s . Эту особенность можно использовать для экспериментального определения дифракционных потерь α в резонаторе КЛ [49, 50]. Расчетная зависимость уровня дифракционных потерь α_{00} на основной моде ТЕМ₀₀ от $\Delta\alpha$ приведена на рис. 10. Линией на том же рисунке показана эмпирическая аппроксимирующая кривая 2, описываемая формулой

$$\alpha_{00} = 0,125 \cdot (\sigma_{01} - \sigma_{00}) + 0,03 \cdot (\sigma_{01} - \sigma_{00}) \cdot (\sigma_{01} - \sigma_{00}). \quad (2)$$

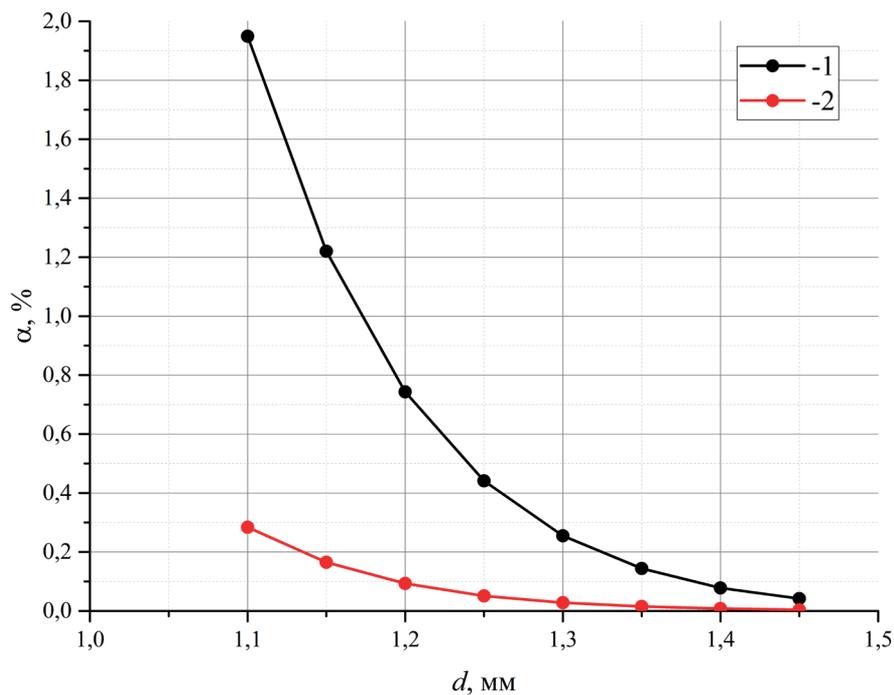


Рис. 9. Зависимости дифракционных потерь от диаметра диафрагмы:
1 – потери на моде TEM_{01} ; 2 – потери на моде TEM_{00}

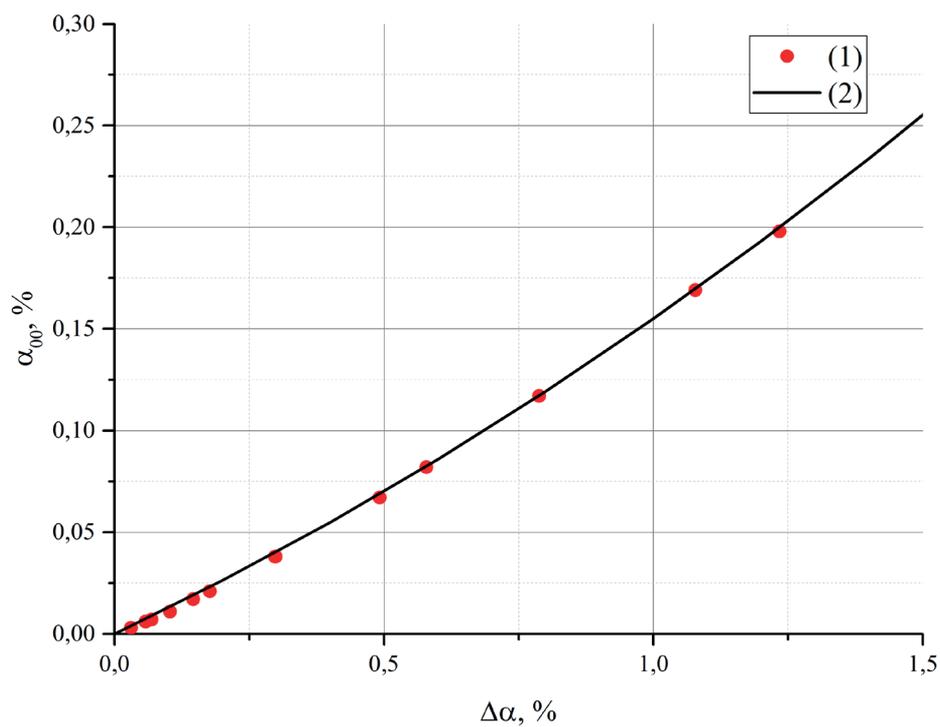


Рис. 10. Зависимость дифракционных потерь от разности потерь мод TEM_{01} и TEM_{00} :
1 – теоретическая зависимость; 2 – аппроксимирующая функция

На рис. 11 представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие связь между суммой потерь зеркал l_{mir} , измеренных на зеркалах до их установки в резонатор, и потерями резонаторов σ_{00} за вычетом дифракционных потерь α_{00} . Фактически это одни и те же характеристики, совпадение которых подтверждает достоверность методики их измерения и расчета ($l_{mir} \approx \sigma_{00} - \alpha_{00}$). Из рис. 11 видно, что экспериментальные точки сосредоточены вокруг асимптоты с единичным наклоном, что говорит о совпадении измеренных величин и подтверждает правильность методики.

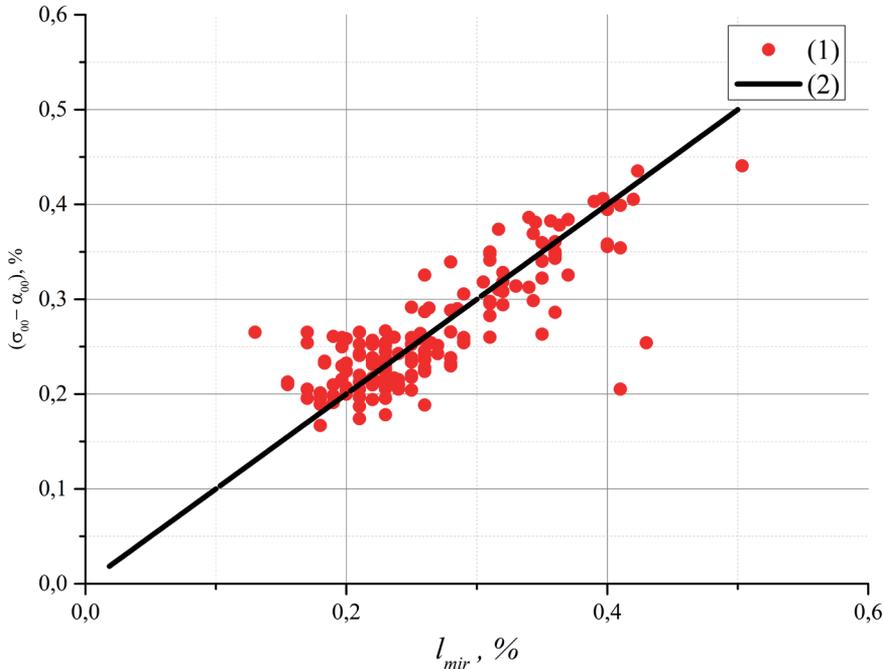


Рис. 11. Связь между суммой потерь зеркал и потерями резонаторов за вычетом дифракционных потерь: 1 – экспериментальные измерения; 2 – аппроксимация

Проведем расчет потерь σ_{00} и частоты зеemanовских биений Δf в зависимости от перестройки периметра КЛ для пьезозеркал с малым углублением мембраны $p = 1$ мм с учетом качества юстировки. Используя компьютерную модель, рассчитываем изменение кривизны отражающей поверхности сферического зеркала R_r . Далее, зная характерные пассивные потери резонаторов (около 0,3%) и задавая крайние значения селективности ($C_s = min$, $C_s = max$), находим дифракционные потери α_{00} и суммарные потери резонатора σ_{00} . Определим частоту зеemanовских биений Δf в зависимости от размера периметра L по суммарным потерям резонатора σ_{00} для двух крайних значений селективности C_s .

Теоретические зависимости Δf (1 и 2) представлены на рис. 12 сплошными линиями. Зависимость 2 с меньшими значениями и меньшим наклоном соответствует минимальной селективности ($C_s = min$, $p = 1$ мм), зависимость 1 с большим наклоном – максимальной селективности ($C_s = max$, $p = 1$ мм).

Частоты зеemanовских биений Δf соответствуют продольным модам одного типа поляризации и однозначно характеризуют потери резонатора на моде с соответствующим продольным индексом. Пунктирными линиями показаны экспериментальные

зависимости Δf 3–6 для продольных мод различных резонаторов КЛ. Их различие связано с точностью юстировки оптического резонатора КЛ и технологическим разбросом потерь зеркал l_{mir} . Как и следовало ожидать, экспериментальные результаты для Δf лежат внутри расчетного диапазона, они демонстрируют хорошее согласование теории с экспериментом.

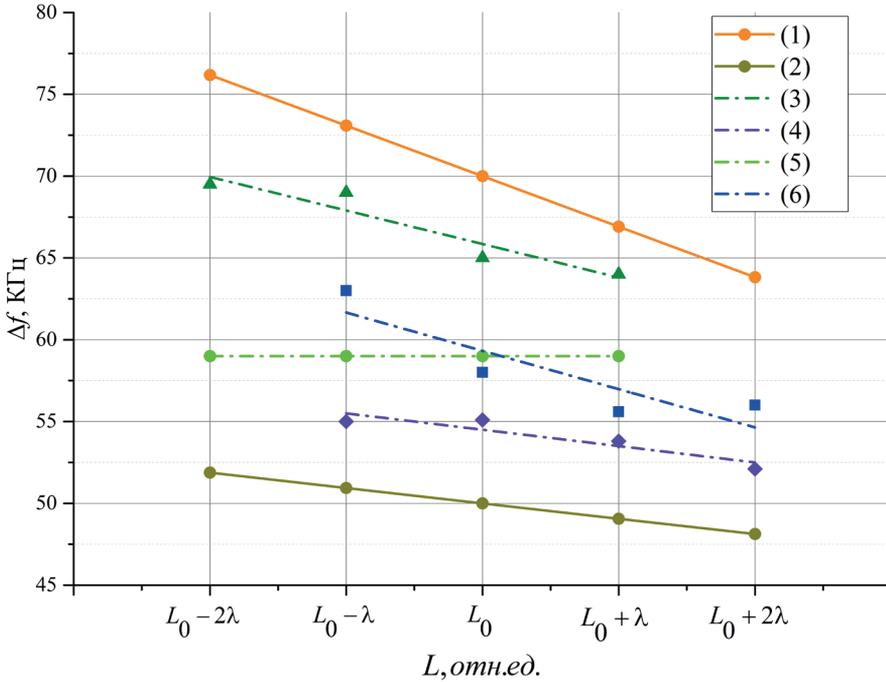


Рис. 12. Зависимость частоты зеемановских биений в ЛГ (пропорциональной потерям резонатора) при перестройке периметра КЛ

По результатам моделирования, представленным на рис. 3, было показано, что углубление мембраны пьезозеркала на величину до $p = 3$ мм позволяет исключить изменение радиуса кривизны отражающей поверхности R_r . Для подтверждения этих результатов был изготовлен образец ПК2 с заглублением мембраны пьезозеркала $p = 3$ мм. На рис. 12 показана зависимость 5 частоты зеемановских биений Δf от размера резонатора для конструкции ПК2 с $p = 3$ мм. Экспериментальная зависимость 5 характерна для всех образцов таких гироскопов. На нее не влияет изменение селективности ($C_s = var$) и размера резонатора КЛ.

Таким образом, конструкция ПК2 с углубленной мембраной позволяет сделать потери резонатора σ_{00} не зависящими от движения пьезозеркала w в допустимых пределах параметров резонатора (l_{mir} и C_s). Сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей на рис. 12 подтверждает выводы исследований и доказывает отсутствие значимых перекосов отражающей поверхности пьезозеркала в ПК2.

Заключение

Проанализированы основные известные конструкции пьезокорректоров ЛГ с точки зрения их устойчивости к перекосам и искривлениям отражающих поверхностей

зеркал при возвратно-поступательном движении под действием пьезопривода, выполняемом для активной стабилизации периметра КЛ в диапазоне изменения внешней температуры.

Построены компьютерные модели ПК и показана возможность изучения перекосов и искривлений поверхностей пьезозеркал по их АЧХ.

Обнаружена связь между изменением внутривибраторных потерь КЛ и наличием перекосов и искривлений отражающих поверхностей пьезозеркал, приводящая к нестабильности смещения нуля ЛГ.

В результате проведенного исследования можно заключить, что нестабильность интенсивности излучения в ЛГ на виброподвесе с ПК1 обусловлена исключительно перекосами отражающей поверхности зеркал, возникающими при отклонении точки приложения усилия пьезопривода от центра упругости пьезозеркала. Для устранения этого эффекта предлагается осуществить коррекцию расположения винта и диска относительно центра пьезозеркала. Кроме того, необходимы меры по предотвращению проскальзывания винта по диску. Можно предложить и другие рекомендации по доработке ПК1: укорочение «лапок» или переход на соединение пьезоблока с зеркалом методом пайки.

Для ПК2, применяемого в зеэмановских и других типах ЛГ, изгибающаяся мембрана, обеспечивающая подвижность пьезозеркала, должна иметь заглупление относительно его поверхности не менее 3 мм.

Предложенные в работе рекомендации позволят повысить устойчивость ЛГ к температурным и механическим воздействиям без изменения конструкции КЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Robin, L., Perlmutter, M.**, *Gyroscopes and IMUs for De-fence Aerospace and Industrial*. Report by Yole development, 2012.
2. **Passaro, V.M.N., Cuccovillo, A., Vaiani, L., De Carlo, M., Campanella, C.E.**, Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective, *Sensors*, 2017; 17(10):2284, <https://doi.org/10.3390/s17102284>.
3. **Ривкин Б.С.** Аналитический обзор состояния исследований и разработок в области навигации за рубежом. Вып. 6. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2021. 68 с.
4. **Damianos, D., Girardin, G.**, *High-End Inertial Sensors for Defense, Aerospace & Industrial Applications*. Market and Technology Report by Yole development, 2020.
5. **Пешехонов В.Г.** Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №2 (109). С. 3–10. DOI 10.17285/0869-7035.0028.
6. **Афанасьев В.Б., Мамаев В.А., Медведев В.М., Остапенко С.Н., Тихменев Н.В.** К вопросам качества и надежности лазерных инерциальных систем // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2023. № 1 (126). С. 87–95.
7. **Shaodi Wang, Zhili Zhang**, Research on principle, application and development trend of laser gyro, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1549(2), 022118.
8. **Волновые и флуктуационные процессы в лазерах** / под ред. Климонтовича Ю.Л. Москва: Главное изд-во физ.-мат. литературы, 1974.
9. **Бычков С.И., Лукьянов Д.П., Бакаляр А.И.** Лазерный гироскоп. Москва: Советское радио, 1975.
10. **Aronowitz, F.**, Fundamentals of the ring laser gyr., *Optical Gyros and their Application, RTO AGARDograph*, 1999, 339, 3-1-3-45.
11. **Lukyanov, D., Filatov, Yu., Golyaev, Yu., Kuryatov, V., Solovieva, T., Vasiliev, V., Buzanov, V., Spectorenko, V., Klochko, O., Vinogradov, V., Schreiber, K.-U., Perlmutter, M.**, 50th anniversary of the laser gyro, *20th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2013, pp. 36–49.
12. **Кравцов Н.В., Кравцов Н.Н.** Невзаимные эффекты в кольцевых лазерах // Квантовая электроника. 1999. Т. 27. №2. С. 98–120.

13. Дао Х.Н., Климаков В.В., Молчанов А.В., Чиркин М.В. Динамика газа в активной среде и нестабильность дрейфа сигнала лазерного гироскопа // Вестник РГРТУ. 2017. №59. С. 136–144.
14. Кузнецов А.Г., Молчанов А.В., Чиркин М.В., Измайлов Е.А. Прецизионный лазерный гироскоп для автономной инерциальной навигации // Квантовая электроника. Т. 45. №1. 2015. С. 78–88.
15. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Савельев И.И. Зеемановские лазерные гироскопы // Квантовая электроника. Т. 45. №2. 2015. С. 171–179.
16. Молчанов А.В. Геометрические параметры кольцевого резонатора в оценке погрешностей лазерного гироскопа // Навигация и управление летательными аппаратами. 2023. №1 (40). С. 37–64.
17. Chopra, K.N., *Ring Laser Gyroscopes. Optoelectronic Gyroscopes. Progress in Optical Science and Photonics*. Springer, Singapore, 2021, 11, https://doi.org/10.1007/978-981-15-8380-3_1.
18. Тихменев Н.В., Назаров С.И., Ушанов А.А., Синельников А.О. Исследование функционирования кольцевого лазерного гироскопа при вибрационных воздействиях // Управление большими системами. 2024. Вып. 109. С. 293–309. DOI: 10.25728/ubs.2024.109.13.
19. Weng, J., Bian, X., Kou, K., Lian, T., Optimization of Ring Laser Gyroscope Bias Compensation Algorithm in Variable Temperature Environment, *Sensors*, 2020, 20(2):377, <https://doi.org/10.3390/s20020377>.
20. Kuznetsov, E., Golyaev, Yu., Kolbas, Yu., Kofanov, Yu., Kuznetsov, N., Vinokurov, Yu., Soloveva, T., Thermal computer modeling of laser gyros at the design stage: a promising way to improve their quality and increase the economic efficiency of their development and production, *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53(10), 596, 1–15.
21. Zubarev, Y.A., Sinelnikov, A.O., Fetisova, N.E., A study of the Temperature Stability of the Zeeman Laser Gyro Ring Resonator, *29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, 2022, pp. 1–4, <https://doi.org/10.23919/ICINS51784.2022.9815336>.
22. Синельников А.О., Медведев А.А., Голяев Ю.Д., Грушин М.Е., Чекалов Д.И. Роль тепловых дрейфов нуля в магнитооптических зеемановских лазерных гироскопах // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. № 4 (115). С. 46–55. DOI 10.17285/0869-7035.0079.
23. Li, Y., Fu, L., Wang, L., He, L., Li, D., Laser Gyro Temperature Error Compensation Method Based on NARX Neural Network Embedded into Extended Kalman Filter, *Advances in Guidance, Navigation and Control. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer, Singapore, 2022, 644:330–3320.
24. Кузнецов Е.В., Синельников А.О., Голяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю., Соловьева Т.И. Компьютерное моделирование работы системы регулировки периметра резонатора зеемановского лазерного гироскопа // Автоматизация в промышленности. 2022. № 3. С. 45–49.
25. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Кузнецов Е.В. Частотная характеристика лазерных гироскопов с учетом неравенства интенсивностей встречных волн // Гироскопия и навигация. 2020. Том 28. №4 (111). С. 71–81. DOI 10.17285/0869-7035.0050.
26. Синельников А.О., Запотьелько Н.Р., Зубарев Я.А., Катков А.А. Особенности применения ситалла СО-115М при изготовлении оптических деталей кольцевых He-Ne лазеров // Стекло и керамика. 2023. Т. 96, № 5(1145). С. 3–13. DOI 10.14489/glc.2023.05.pp.003-013.
27. Наумов А.С., Сигаев В.Н. Прозрачные ситаллы на основе литиевоалюмосиликатной системы // Стекло и керамика. 2023. Т. 96. № 11. С. 54–63. DOI: 10.14489/glc.2023.11.pp.054-063.
28. Наумов А.С., Алексеев Р.О., Савинков В.И., Сигаев В.Н. Зарождение и рост кристаллов в объеме стекла на основе системы $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ // Стекло и керамика. 2023. Т. 96, №8. С. 3–11. DOI 10.14489/glc.2023.08.pp.003-011.
29. Зубарев Я.А., Синельников А.О., Мнацаканян В.У. Моделирование температурного дрейфа периметра лазерного гироскопического датчика // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. №1. С. 30–39. doi: 10.22363/2312-8143-2023-24-1-30-39.
30. Сигаев В.Н., Савинков В.И., Шахгильдян Г.Ю., Наумов А.С., Лотарев С.В., Клименко Н.Н., Голубев Н.В., Пресняков М.Ю. О возможности прецизионного управления температурным коэффициентом линейного расширения прозрачных литиево-алюмосиликатных ситаллов вблизи нулевых значений // Стекло и керамика. 2019. Т. 92, №12. С. 11–16.
31. Голяев Ю.Д., Запотьелько Н.Р., Недзвецкая, А.А., Синельников А.О. Термостабильные оптические резонаторы для зеемановских лазерных гироскопов // Оптика и спектроскопия. 2012. Т. 113. №2. С. 253–255.
32. Сухов Е.В., Запотьелько Н.Р. Зависимость формы и угла отражающей поверхности зеркального пьезокорректора от управляющего напряжения. Инновационные технологии в электронике и при-

- боростроении // Сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием. Москва: МИРЭА – Российский технологический университет, 2021. Т. 1. С. 293–296.
33. **Ma Yanghua, Quan Bingxin, Han Zonghu, Wang Jiliang**, Structural optimization of the length control mirror for ring laser gyro, *Second International Conference on Photonics and Optical Engineering*, 2017, doi:10.1117/12.2256501.
34. **Запотылько Н.Р., Катков А.А., Недзведская А.А.** Пьезокорректор для компенсации тепловых вариаций длины оптического пути резонатора лазерного гироскопа // *Оптический журнал*. 2011. Т. 78. №10. С. 10–12.
35. **Запотылько Н.Р., Катков А.А., Синельников А.О.** Пассивная термокомпенсация оптического периметра лазерных гироскопов, изготовленных с использованием различных конструкционных материалов // *Датчики и системы*. 2014. № 1(176). С. 8–13.
36. **Борисов М.В., Черноморский А.И., Чиркин М.В.** Особенности выбора и оценки параметров пьезокорректоров в кольцевом резонаторе малогабаритного лазерного гироскопа // *Авиакосмическое приборостроение*. 2015. № 11. С. 13–20.
37. **Ищенко Е.Ф.** Анализ деформаций осевого контура оптического резонатора // *ЖПС*. 1969. Т. 11. №3. С. 456–463.
38. **Ищенко Е.Ф.** Открытые оптические резонаторы: Некоторые вопросы теории и расчета. Москва: Советское радио, 1980. 208 с.
39. **Ананьев Ю.А.** Оптические резонаторы и лазерные пучки. Москва: Наука, 1990. 264 с.
40. **Быков В.П., Силичев О.О.** Лазерные резонаторы. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 320 с.
41. **Власов А.В., Запотылько Н.Р., Катков А.А. и др.** К вопросу о технологии изготовления пьезоматериалов для лазерной гироскопии с использованием холодного одноосного прессования и спекания // *Ползуновский вестник*. 2022. №2. С. 129–138. DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.02.018.
42. **Пиппарт А.** Физика колебаний. Москва: Высшая школа, 1985. 456 с.
43. **Когельник Х.** Коэффициенты связи и коэффициенты преобразования волн в оптических системах // *Квазиоптика*. Москва: Мир, 1966. С. 210–225.
44. **Хирд Г.** Измерение лазерных параметров. Москва: Мир, 1970. 540 с.
45. **Федоров А.Е., Зборовский В.А., Рекунов Д.А. и др.** Установка для юстировки зеркал и измерения потерь резонатора лазерного гироскопа // *Материалы XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам*, 2015. С. 308–313.
46. **Азарова В.В., Бессонов А.С., Бондарев А.Л., Макеев А.П., Петрухин Е.А.** Двухканальный способ измерения потерь в кольцевом оптическом резонаторе на длине волны 632.8 нм // *Квантовая электроника*. 2016. 46:7. 650–654 [Quantum Electron., 2016, 46:7, 650–654].
47. **Хромых А.М., Якушев А.И.** Влияние пленения резонансного излучения на эффект Зеемана в кольцевом лазере // *Квантовая электроника*. Т.4. № 1. 1977. С. 27–34.
48. **Савельев И.И., Хромых А.М.** Продольные моды объемного кольцевого резонатора // *Квантовая электроника*. 1976. Т. 3. №7. С. 1517–1521.
49. **Tikhmenev, N., Korshunov, S., Bannikov, D., and Protsenko, I.**, Measurement of Losses of Precision Mirrors of Ring Lasers, *29 Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, Saint Petersburg, Russian Federation, 2022, pp. 1–3, [https://doi: 10.23919/ICINS51784.2022.9815346](https://doi.org/10.23919/ICINS51784.2022.9815346).
50. **Коршунов С.Е., Тихменев Н.В.** Измерение потерь прецизионных зеркал кольцевых лазеров // *Мир авионики*. 2012. №6. С. 28–33.

Bolotnov, S.A., Nazarov, S.I., Sinel'nikov, A.O., Tikhmenev, N.V., and Ushanov, A.A. (State Scientific Research Institute of Instrument Engineering (GosNIIP), Moscow)

Analysis of Laser Gyro Errors during Path Length Active Stabilization, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2024, vol. 32, no. 3, pp. 3–20.

Abstract. The paper considers active stabilization of a laser gyro path length in a wide range of temperatures, using a movable mirror with a piezoceramic drive. Analysis of the main designs of piezo adjusters used in the laser gyros made in Russia is presented. Computer models of piezo adjusters have been developed to study the distortions and curvatures of piezo-driven mirror surfaces based on their resonant oscillatory characteristics. By comparing the calculated data and the experimental results, a relationship between the movements of mirrors and the output parameters of laser gyroscopes has been found. Possible improvements of piezo adjuster structures are proposed, which make it possible to increase the accuracy and performance characteristics of laser gyroscopes.

Key words: laser gyroscope, piezo adjuster, piezo-driven mirror, piezoelectric block, resonant oscillations, oscillation types, modes, total energy loss in resonator, diffraction loss, error model, path length control system.

Материал поступил 28.01.2024