

ПЬЕЗОКОРРЕКТОРЫ НАНОПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРИМЕТРОМ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ

Н.Р.Запотылько, А.А.Недзвецкая

ФГУП «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стедьмаха

Special adjusting devices called piezodrivers are used for pathlength controlling in a ring laser gyroscope. In this article there is given a review of existing devices described in patent and other published sources. There are considered working requirements to piezodrivers of a membrane type as parts of laser gyroscopes developed in Research & Development Institute "Polyus". For a specific type of piezodriver there are presented graphic dependences of the design optimisation on criterion function of the mirror moving and a calculation of dynamic characteristics.

Введение

Одним из перспективных и развивающихся направлений квантовой электроники является исследование и создание прецизионных лазерно-оптических измерительных устройств. К ним относятся лазерные гироскопы, линейные лазеры, стабилизированные по частоте или с управляемым сканированием частоты, оптические анализаторы спектра, интерферометры и другие приборы.

В таких устройствах определяющей задачей является прецизионное управление частотой генерации лазера. Решение ее сводится к высокоточному управлению длиной резонатора лазера. Точность управления при этом должна составлять доли длины волны излучения. Для интересующего нас оптического диапазона необходимые точности лежат в пределах одной сотой микрона.

Для лазерного кольцевого прибора одним из важных факторов, влияющих на стабильность его работы, является стабильность периметра в широком интервале температур. В любом случае изменение длины лазерного канала за счет теплового расширения корпуса, вызванного изменением температуры, приводит к нарушению работы прибора. Колебания периметра вызывают перемещение частот генерации кольцевого лазерного гироскопа по доплеровскому контуру усиления [1]. В связи с этим возникает необходимость в стабилизации периметра резонатора.

В настоящее время существуют пассивные и активные методы стабилизации периметра. Пассивные методы стабилизации периметра предполагают уменьшение дестабилизирующих факторов за счет термостатирования лазера, изготовление несущей конструкции резонатора из материалов, обладающих малым температурным коэффициентом линейного расширения [2]. Это такие материалы как плавленый кварц КУ-1, легированный кварц КЛР-1-1, ситалл СО-115М. Но пассивные методы

стабилизации периметра не могут обеспечить достаточной стабильности, поэтому на практике они применяются совместно с активными.

Активные методы стабилизации периметра резонатора заключаются в создании внешней отрицательной обратной связи, которая корректирует управление в зависимости от состояния объекта. Благодаря наличию обратной связи получают сигнал ошибки по выходному параметру и регулируют оптическую длину резонатора таким образом, чтобы сигнал ошибки стремился к нулю. Корректировка оптической длины резонатора производится обычно путем изменения расстояния между отражающими поверхностями или путем изменения показателя преломления среды, заполняющей оптический резонатор.

Активные методы стабилизации периметра по методу получения сигнала ошибки делятся на два типа:

- стабилизация частоты с использованием внешнего эталона;
- стабилизация частоты по характерным точкам кривой усиления.

Для кольцевого лазерного гироскопа наиболее пригодным оказался второй тип стабилизации.

В качестве исполнительных элементов для стабилизации периметра чувствительного элемента гироскопа в этих условиях применяют корректирующие зеркала [3], входящие в систему регулировки периметра (СРП) [1]. Корректирующие зеркала, приводимые в движение пьезоэлектрическими приводами (далее – пьезоприводами), являются составными частями лазерного гироскопа, называемыми пьезокорректорами (ПК).

Анализ зарубежной патентной литературы показывает, что разработкам пьезокорректоров и оптимизации их конструкций уделяется очень серьезное внимание, так как это проблема не только техническая, но и экономическая.

В статье рассмотрены проблемы, связанные с управлением периметра кольцевого лазерного гироскопа с помощью пьезокорректоров.

1. Литературный обзор конструкций пьезокорректора с пьезоприводом пакетного и мембранного типов

Пьезокорректор представляет собой сборку зеркала с пьезоприводом. Из анализа проведенных литературных исследований следует, что все множество конструктивных разработок пьезоприводов для коррекции длины резонатора можно разделить на два основных типа: пакетный и мембранный.

Пьезоприводы пакетного типа разрабатывались фирмами США «Singer Company» [4-7]; «Honeywell International Inc.» [8, 19]; «New Jersey Institute of Technology» [20]; Франции «Societe Francaise d'Equipements pour la Navigation Aerienne» [9]; ФРГ «Forschungs- und Versuchsanstalt fur Luft- und Raumfahrt» [10, 11]; Швеции «Corporation» [12].

Среди отечественных разработок в ФГУП «НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха пьезоприводы пакетного типа использовались до 1976 года, активность зарубежных публикаций по этому типу привода заметно снижается после 1987 года [13].

Пьезопривод пакетного типа (см. рис. 1) представляет собой сборку из нескольких кольцевых пьезокерамических дисков, между которыми проложены кольцевые металлические контакты для подвода электрического напряжения к электродам пьезокерамики. Пьезокерамические элементы электрически соединены таким образом, что подача напряжения на электроды приводит к увеличению толщины каждого элемента и, как следствие этого, высоты всего столбика. Поперечные размеры при этом уменьшаются.

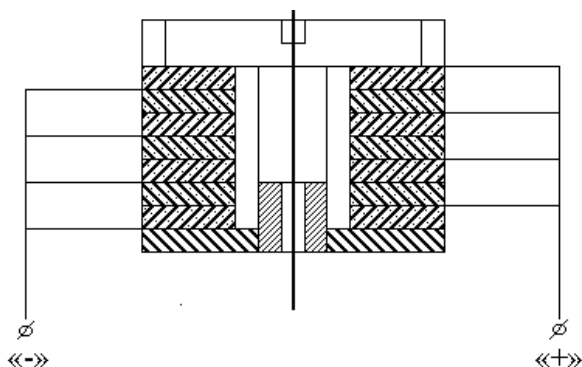


Рис. 1. Пьезопривод пакетного типа.

По способу соединения пьезоэлементов в столбик или в пакет пьезоприводы можно разделить на два вида. В одном случае [4, 10, 11] пьезоэлементы и металлические контакты соединяются друг с другом с помощью болта и гайки. Здесь имеет место только механический контакт сборочных единиц. Данный вариант исполнения имеет свои преимущества: простота изготовления пьезопривода, возможность разборки пакета и замены вышедших из строя элементов. Основным недостатком приведенной конструкции является необходимость затраты части полученной механической энергии на растягивание болта, при этом высота всего пакета изменяется в меньшей степени и зависит от жесткости болта.

Другой вариант исполнения пьезопривода пакетного типа [7] предполагает склеивание пьезоэлементов и металлических контактов клеями на основе эпоксидной смолы или токопроводящим клеем. Склеенная сборка помещается в корпус, где одним своим концом упирается в стенку корпуса, а другим – в металлическую перемещаемую мембрану. Основным недостатком такой конструкции является трудоемкость ее изготовления и невозможность реставрации.

В настоящее время пакетный тип пьезопривода для лазерной гироскопии практически не используется вследствие больших размеров. Он необходим для создания импульсных перемещений и находит применение, например, в лазерных затворах.

Мембранный тип пьезопривода (см. рис. 2) наиболее интенсивно исследуется и совершенствуется в последнее время. В основе его работы лежит изгиб мембраны за счет изменения диаметра пьезоэлементов,

связанного с пьезомодулем d_{31} , при этом свободное изменение его толщины на изгиб не влияет.

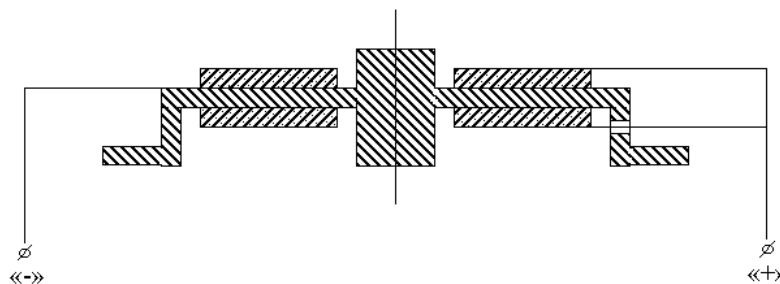


Рис. 2. Пьезопривод мембранного типа.

Пьезоприводы указанной конструкции, разрабатываемые такими ведущими фирмами США как «Litton Systems», «The Singer Company», «Honeywell International Inc.», представлены в патентах [15 – 18].

Пьезопривод включает в себя мембрану, выполненную из металла типа инвар, имеющего низкий температурный коэффициент линейного расширения [16, 18], или стекла типа Cervit или Schott Zerodur [15, 17], на которой методом склейки [15, 16, 18], диффузионной сварки или пайки [17] с двух сторон закреплены два [16 – 18] или четыре [15] пьезоэлемента. Профиль мембраны может быть различным и определяется конструкцией пьезопривода.

В рассматриваемом типе пьезопривода пьезоэлементы электрически соединены таким образом, что при приложении электрического напряжения к контактам пьезопривода один пьезоэлемент радиально расширяется, в то время как другой радиально сужается. Таким образом, возникающие моменты изгибают мембрану, вызывая наибольшее осевое перемещение центральной части мембраны относительно закрепленного корпуса. В настоящее время для лазерной гироскопии в основном используются пьезоприводы мембранного типа

На рис. 3 представлена конструкция пьезокорректора с пьезоприводом мембранного типа, используемая в разработках ФГУП «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха.

Зеркало, как единую деталь, условно можно представить совокупностью нескольких элементов: толстостенного кольцевого корпуса (7), мембраны (5) с диэлектрическим покрытием (6) и передаточного центрального стержня (4). В ряде случаев мембрана зеркала обеспечивает герметичность рабочего объема лазера.

Пьезопривод состоит из мембраны (3), выполненной из того же материала, что и зеркало, и двух припаянных к ней пьезокерамических элементов (1, 2). При подаче на электроды пьезокерамических элементов (ПКЭ) электрического напряжения U_1 и U_2 вследствие их деформирования и наличия жесткой связи с мембраной пьезопривода возникают механические моменты, которые изгибают вышеупомянутую мембрану. Вследствие того,

что мембрана пьезопривода (3) крепится к зеркалу по кольцевой поверхности корпуса и в центральной части – к стержню (4) посредством припоя (8), развиваемое пьезоприводом усилие через передаточный стержень воздействует на мембрану зеркала, которая также изгибается и вызывает поступательное перемещение центральной части с отражающим покрытием.

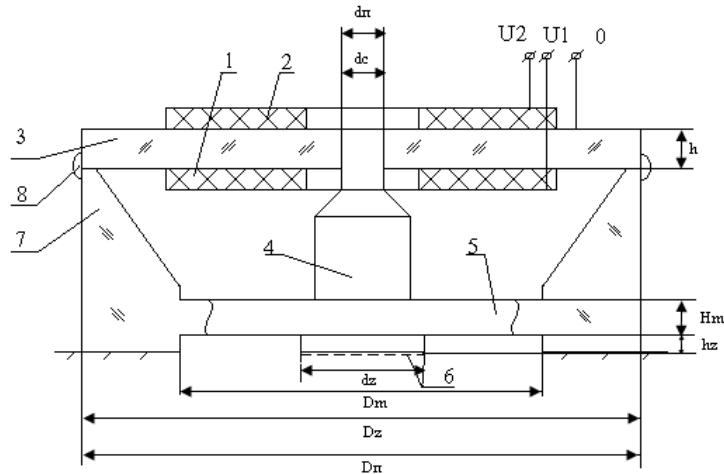


Рис. 3. Пьезокорректор с пьезоприводом мембранного типа.

Как видно из приведенного краткого описания литературных и патентных источников из области систем управления движением и положением поверхностей оптических устройств, проблема эффективной стабилизации параметров оптического резонатора при внешних воздействиях очень актуальна. Найти оптимальное решение этой задачи, сочетающее высокую эффективность пьезокорректора, низкие управляющие напряжения с минимальной стоимостью – цель упорных разработок ведущих фирм многих стран.

2. Требования, предъявляемые к пьезокорректору, для его эффективной работы в составе лазерного гироскопа

Практика эксплуатации пьезокорректоров в составе лазерных гироскопов определила основные требования к ним. Это:

- обеспечение требуемого перемещения зеркала при минимальном управляющем напряжении;
- сохранение плоскостности зеркала при работе пьезокорректора и отсутствие его перекосов;
- удаленность резонансных частот собственных колебаний от частот внешних возмущений;
- собственная термостабильность пьезокорректора.

Предварительный анализ пьезокорректоров с пакетным и мембранным пьезоприводами показал, что пьезокорректор с пакетным приводом обладает неустранимой температурной нестабильностью.

Пьезопривод мембранного типа принципиально может быть сбалансирован относительно теплового ухода симметричным расположением пьезоэлементов относительно пассивного диска.

В связи с этим нами был выбран и детально исследован пьезокорректор с приводом мембранного типа.

3. Система регулировки периметра кольцевого лазерного гироскопа

В ФГУП «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха разрабатываются гироскопы, периметр резонатора которых имеет квадратную форму. В углах оптического контура расположены четыре зеркала: два пьезозеркала, одно плоское и одно сферическое. На рис. 4 представлена фотография резонатора одного из разрабатываемых в НИИ «Полюс» гироскопов.

Для настройки частоты генерации чувствительного элемента (ЧЭ) на центр кривой усиления при включении прибора, а также при изменении периметра ЧЭ вследствие изменения температуры корпуса резонатора, служит система регулировки периметра.



Рис. 4. Резонатор кольцевого лазерного гироскопа.

СРП является важнейшей системой обеспечения работы кольцевого лазерного гироскопа, в значительной степени определяющей его выходные параметры [1, 21]. Структурная схема СРП представлена на рис. 5.

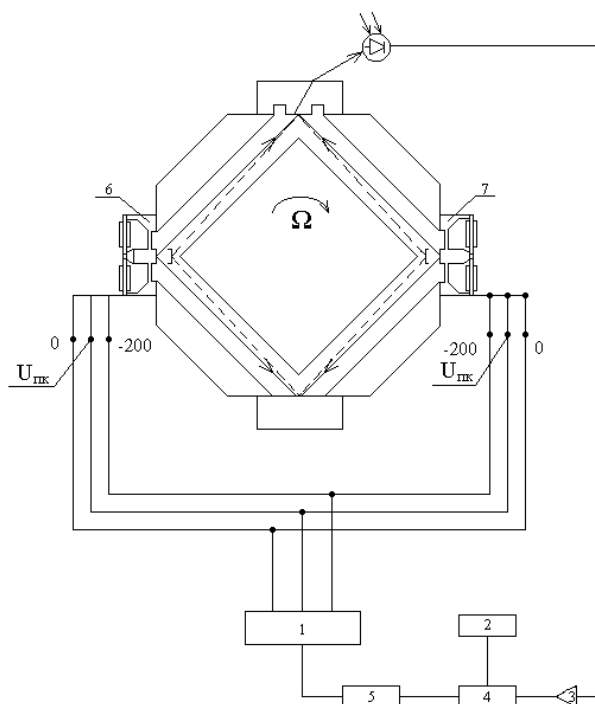


Рис. 5. Система регулировки периметра кольцевого лазерного гироскопа.
 1 – выходной усилитель; 2- частотная подставка; 3 – усилитель; 4 – фазовый детектор; 5 – индикатор; 6, 7 – пьезокорректоры (ПК1, ПК2).

Рассмотрим более подробно работу системы регулировки периметра лазерного гироскопа с квадратной формой контура. Он содержит 4 зеркала, два из которых подвижные (ПК1, ПК2), фотопреобразователь и электронную схему СРП. Она обеспечивает генерацию кольцевого лазера в центре контура усиления активной среды.

Основным источником погрешностей резонатора являются температурные деформации как внешней природы, так и от саморазогрева лазера. Стабилизация периметра с точностью 0,01 мкм достигается перемещением зеркал пьезокорректоров с точностью 40 Ангстрем во всем интервале рабочих температур. Работает СРП следующим образом.

При постоянстве температуры окружающей среды резонатор не деформируется, следовательно, периметр резонатора остается постоянным, лазер работает на определенной продольной моде, на выходе фотоприемного устройства сигнал ошибки отсутствует.

При изменении температуры окружающей среды вследствие теплового расширения материала, из которого изготовлен блок резонатора, будет меняться периметр гироскопа, что может привести к срыву генерации на рабочей моде и возникновению сигнала на фотоприемном устройстве. Полученный сигнал поступает на усилитель (3), фазовый детектор (4), работа которого синхронизируется блоком частотной подставки (2). Далее аналоговый сигнал поступает на интегратор (5) и выходной усилитель (1). Выходной усилитель усиливает аналоговый сигнал до нужного значения. Усиленное до определенного значения напряжение подается на параллельно включенные пьезопроводы обоих пьезокорректоров, которые, деформируясь,

вызывают прогибы мембран пьезозеркал, что приводит к перемещению их центральных частей. Направление перемещения определяется знаком управляющего напряжения.

Таким образом, за счет системы отрицательной обратной связи пьезокорректоры мгновенно отрабатывают любое изменение периметра кольцевого лазерного гироскопа.

Для нормальной работы лазера необходимо обеспечить изменение периметра резонатора ΔP в пределах 2λ при изменении напряжения на пьезокерамических элементах от 0 до 200В. При заданном ΔP мы можем определить величину перемещения зеркал h , необходимую для достижения изменения периметра на $\Delta P = 2\lambda$, что и обеспечивает необходимый диапазон подстройки:

$$h = \frac{\Delta P}{2\sqrt{2}}, \text{ мкм.}$$

Для кольцевого лазерного гироскопа, имеющего периметр 160 мм, перемещение каждого из двух зеркал, которое должны обеспечить пьезопроводы, составит 0,448 мкм.

Однако, при использовании пьезокорректора в качестве элемента подстройки периметра, возникают трудности, связанные с конечной жесткостью крепления конструкции, что приводит к повышенному восприятию вибрационных нагрузок. Поэтому при конструировании и расчете пьезокорректора необходимо одновременно стремиться к обеспечению достаточной чувствительности к управляющему напряжению и уменьшению амплитуды несанкционированных колебаний, вызванных вибрационными перегрузками.

4. Физическая модель пьезокорректора, расчет оптимальной конструкции

Основными выходными характеристиками, которыми обладает пьезокорректор, являются: зависимость перемещения зеркала (W_3) от подаваемого напряжения в статическом режиме, чувствительность перемещения зеркала к изменениям температуры (собственная термостабильность), а также чувствительность к вибрациям и ударам, что характеризуется значением частоты поперечных колебаний основного резонанса в динамическом режиме работы.

При разработке кольцевых лазерных гироскопов существует необходимость использования пьезокорректоров оптимальной конструкции для уменьшения управляющих напряжений при сохранении динамических характеристик.

Научный подход к решению поставленных задач состоял в создании расчетной физической модели пьезокорректора [22], которая была разработана совместно с Московским институтом электроники и математики (МИЭМ).

Основой для создания расчетных методик послужило экспериментальное моделирование пьезокорректора методом фотоупругости и численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ).

Сложность разработки модели заключалась в многослойности конструкции, электрофизические свойства которой меняются по толщине. Расчетная модель пьезопривода построена на представлении его конструкции многослойными кольцевыми блоками с учетом граничных условий.

На базе расчетной модели разработан пакет компьютерных программ. Он позволяет решать статические и динамические задачи моделирования в диалоговом режиме.

Для оценки достоверности расчетных результатов моделирования пьезокорректоров были изготовлены опытные образцы, проведены их натурные испытания и сравнение результатов с расчетами. Пьезокорректоры подвергались статическим и динамическим испытаниям. В статических испытаниях измерялись перемещения свободного пьезопривода и перемещения зеркала в сборке. Управляющее напряжение на пьезокерамических элементах изменялось от 0 до 200 В. Измерения перемещений пьезопривода и зеркала проводились опикатором 0,1П с ценой деления 0,1 мкм. Погрешность измерения 0,12 мкм.

При динамических исследованиях измерялись частоты f первого резонанса поперечных колебаний мембран пьезокорректора. Испытания проводились двумя методами: 1) по измерению амплитуды отклика на пассивном элементе; 2) путем записи амплитудно-частотных характеристик.

Для каждого образца строилась расчетная модель, по которой определялись аналогичные параметры пьезопривода и пьезокорректора. Расхождение теоретических и экспериментальных данных для пьезоприводов составило от 1,1 % до 16,8 %, для пьезокорректоров - от 0,3 % до 17 %, среднее расхождение по всем образцам для пьезоприводов составило 8,3 %, для пьезокорректоров – 7,7 %.

При исследовании первого резонанса частоты поперечных колебаний выявлено, что среднее расхождение между опытными и теоретическими значениями не более 5 %, т.е. не превышает погрешность эксперимента.

Результаты проведенного теоретического анализа убедительно доказывают состоятельность разработанной физической модели пьезокорректора как в части статических, так и динамических исследований.

С использованием модели проведена теоретическая оптимизация реальной конструкции пьезокорректора, используемого в мелкосерийном производстве лазерных гироскопов в НИИ «Полюс», по целевой функции перемещения зеркала. При расчетах принят вариант закрепления пьезопривода на зеркале, близкий к шарнирному опиранию. При этом коэффициенты упругой связи пьезопривода с зеркалом, учитывающие сопротивление сдвигу (k_n) и повороту (k_m), приняты равными: $k_n = 7000$, $k_m = 1000$.

Пьезокорректор имеет следующие характеристики (см. рис. 3):
- внешние диаметры зеркала (D_z) и пьезопривода (D_p), мм – 30;

- диаметр центрального отверстия пьезопривода (d_p), мм – 3;
- диаметр мембраны зеркала, (D_m), мм – 18;
- диаметр центрального стержня зеркала, (d_c), мм – 3;
- диаметр выступа зеркала с диэлектрическим покрытием, (d_z), мм – 6;
- высота выступа зеркала с диэлектрическим покрытием, (h_z), мм – 3;
- толщина мембраны пьезопривода (h), мм – варьировалась от 0,5 до 3;
- толщина мембраны зеркала (H_m), мм – варьировалась от 0,8 до 1,4;
- габариты пьезоэлементов, мм – $\varnothing 23 \times \varnothing 4 \times 0,4$;
- пьезомодуль пьезоэлементов (d_{31}), Кл/Н – 180×10^{-12} .

Теоретические зависимости перемещения зеркала от толщины мембраны привода при различных толщинах мембраны зеркала представлены на рис. 6. Величины перемещения зеркала рассчитаны при подаче на электроды пьезокерамических элементов электрического напряжения 200 В. Здесь же указаны значения резонансных частот. Звездочкой обозначены параметры существующей конструкции ($h=1,2$ мм, $H_m=1,4$ мм).

Расчетами показано, что увеличение толщины мембраны привода с 1,2 до 1,8 мм и уменьшение толщины мембраны зеркала с 1,4 до 1,0 мм дает оптимальную конструкцию по величине перемещения зеркала при сохранении динамических характеристик.

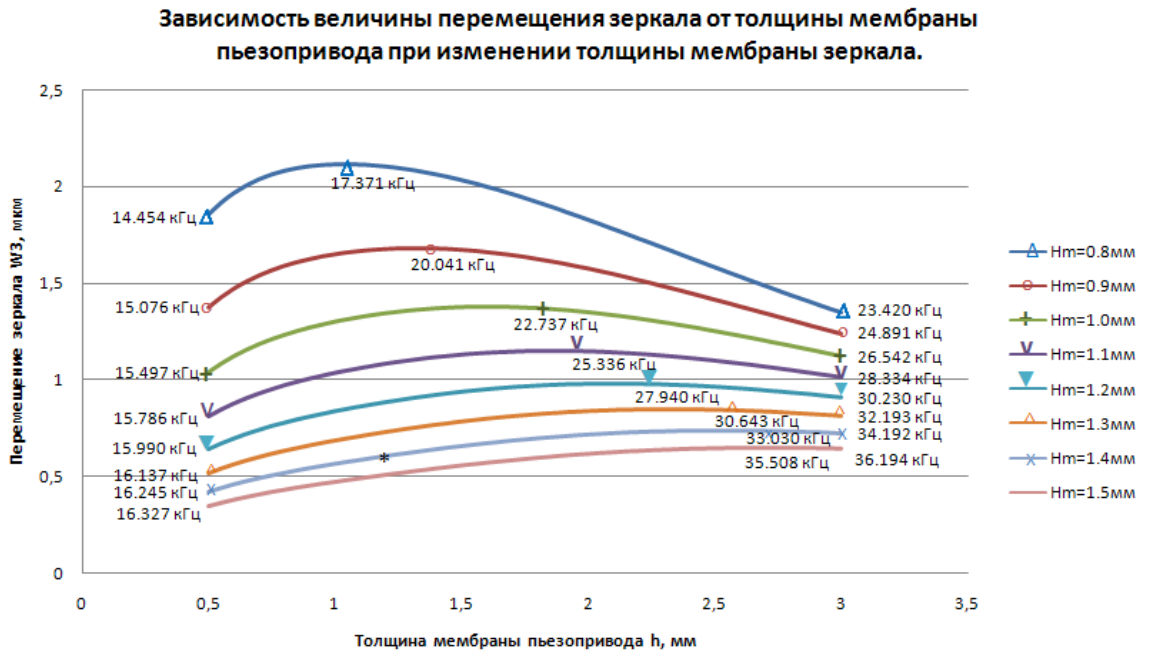


Рис. 6. Зависимость величины перемещения зеркала от толщины мембраны пьезопривода при изменении толщины мембраны зеркала.

Проведенные исследования позволили провести разработку пьезокорректоров нескольких конструкций для различных применений.

Выводы

1. Проведенные патентные и литературные исследования показывают преимущественное применение пьезоприводов мембранного типа при их использовании в кольцевых лазерных гироскопах.
 2. В результате расчетов по оптимизации конструкции пьезокорректора мембранного типа выявлено, что для увеличения перемещения зеркала необходимо увеличивать толщину мембраны пьезопривода и уменьшать толщину мембраны зеркала.
 3. Разработанный типоряд пьезокорректоров успешно применяется в кольцевых лазерных гироскопах для обеспечения их устойчивой работы в широком диапазоне параметров внешних условий эксплуатации.
1. Голяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю., Толстенко К.А., Точилкин С.А. Система регулировки периметра для зеемановского кольцевого лазера с настройкой на продольную моду с заданной четностью. Электронная техника, сер. "Лазерная техника и оптоэлектроника", вып. 1 (57), 1991, - с. 68 - 70.
 2. Бычков С.И., Лукьянов Д.П., Бакаляр А.И. Лазерный гироскоп. М., "Советское радио", 1975.
 3. Запотьлыко Н.Р. Современные пьезокорректоры высокостабильных газовых лазеров для измерительных систем. Лазерные новости, вып. 2, 1996.

4. Adjustable, thin Membrane Mirror for use in the stabilization of Ring Lasers. Patent US, № 3,581,227; - 25.05.1971.
5. Pathlength Controller for a Ring Laser Gyroscope. Patent US, № 4,267,478; - 12.05.1981.
6. Pathlength Controller for a Ring Laser Gyroscope. Patent US, № 4,320,974; - 23.03.1982.
7. Piezoelectric Actuator for a Ring Laser. Patent US, № 4,160,184; - 03.07.1979.
8. Piezoelectrical Control Element. Patent US, № 4,488,080; - 11.12.1984.
9. Actionneur piezoelectrique pour gyroscope a laser en anneau. Demande de brevet d'invention № 7830925 (republique Francaise), - 03.08.1979.
10. Piezoceramic Servo-drive for Producing Translational Motion, especially for Application to Ring Laser Mirrors. Patent US, № 4,639,630; - 27.01.1987.
11. Process and Apparatus for Attenuating linearity Errors in a Ring Type Laser Rate Gyro. Patent US, № 4,348,113; - 07.09.1982.
12. Ring Laser Gyro Pathlength control Mechanism. Patent US, № 4,969,726; - 13.11.1990.
13. Solid body piezoelectric bender transducer. Patent US, № 5,225,731; - 06.07.1993.
14. Ringlaser, insbesondere fur Ringlaserkreisel. Patent European, № EP 0 157 319 A2; - 09.10.1985.
15. Apparatus for thermal tuning of Path Length Control Drivers. Patent US, № 5,148,076; - 15.09.1992.
16. Controllable Mirrors. Patent US, № 4,383,763; - 17.05.1983.
17. Glass Driver for Laser Mirror. Patent US, № 4,824,253; - 25.04.1989.
18. Pathlength Controller for a Ring Laser Gyroscope. Patent US, № 4,691,323; - 01.09.1987.
19. Co-fired piezo driver and method of making for a ring laser gyroscope. Patent US, № 6,515,403 B1; - 04.02.2003.
20. High accuracy piezoelectric positioning device. Patent US, № 5,686,777; - 11.11.1997.
21. Молчанов А.В. Исследование исполнительного элемента системы регулировки периметра лазерного гироскопа. Электронная техника, сер. "Лазерная техника и оптоэлектроника", вып. 3 (59), 1991, - с. 45 - 48.
22. Виноградов А.Н., Запотьлько Н.Р. Математическая модель многослойного пьезоэлектрического преобразователя с учетом теплового воздействия. Тезисы докладов на Всероссийской НТК "Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления", т. I, Гурзуф, 1994, с. 106-107.