

## КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ГИБРИДНЫХ ВОЛНОВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ И МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

И. А. УЛИТКО<sup>1</sup>, Т. В. АНДРУЩЕНКО<sup>1</sup>, В. Г. БУГРИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, г. Киев, Украина,

<sup>2</sup>ООО «Надра – Интегрированные решения», г. Киев, Украина

Рассматриваются вопросы особенностей и отличий разных конструктивных типов современных датчиков угловых скоростей – волнового твердотельного и микромеханических гироскопов. Проанализированы требования к характеристикам гироскопических датчиков в разных отраслях науки и производства. Приведены примеры практической производственной реализации названных приборов зарубежными и отечественными производителями. Подано авторскую точку зрения на проблему дальнейшего развития гироскопической аппаратуры, предложено концепцию создания пластинчатого гироскопа.

### ВВЕДЕНИЕ

Для последнего десятилетия характерно бурное развитие научно-технических направлений, связанных с созданием инерциальных приборов контроля параметров движения. Современные тенденции в развитии гироскопических приборов и систем условно можно разделить на два направления. Первое направление предусматривает дальнейшее совершенствование технологий производства традиционных электромеханических приборов и методов обработки полученной информации, второе – ориентировано на минимизацию чувствительных элементов путем применения микро-, нанотехнологий и построения датчиков с использованием новых физических эффектов.

На задаче создания новых и усовершенствовании существующих типов гироскопических датчиков акцентируются значительные усилия разработчиков, так как их метрологические характеристики в итоге определяют качество и возможности создаваемых приборов.

### 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТИПЫ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

Проблема выбора оптимального прибора контроля параметров движения неоднозначна и требует учета многих параметров – точности гироскопа и характера ее изменения во времени, массогабаритных характеристик, энергозатратности, стоимости, особенностей эксплуатации, в том числе в условиях экстремального внешнего воздействия [5]. Возрастающие требования к эксплуатационным характеристикам гироскопических приборов ставят перед учеными и инженерами не только задачу усовершенствования классических гироскопов с вращающимся ротором, но и поиска принципиально новых идей в области создания датчиков измерения угловых скоростей. Сегодня состояние гироскопической отрасли позволяет создавать навигационные приборы на основе разнообразных датчиков угловых скоростей и ускорений: динамически настраиваемых (ДНГ); волновых твердотельных (ВТГ); волоконно-оптических (ВОГ); роторных механических гироскопов (РМГ); лазерных гироскопов (ЛГ); микромеханических (MEMS) гироскопов и других [1,4]. В процессе развития гироскопии важным этапом стал переход от классических схем с вращающимся ротором

к использованию резонаторов статического типа, которые давали гироскопам ряд преимуществ:

- отсутствие вращающихся частей и очень большую износостойкость, рабочий ресурс прибора;
- достаточно высокую точность и малую случайную погрешность;
- устойчивость к условиям окружающей среды (термобарическим условиям, вибрации);
- сравнительно небольшие вес, габариты и энергопотребление.

Среди наиболее распространенных гироскопов со статическим резонатором – волновые твердотельные и микромеханические гироскопы.

### 1.1. Волновые твердотельные гироскопы

Принцип действия ВТГ основан на свойстве изгибных колебаний тонкостенного полусферического резонатора сохранять ориентацию в пространстве. При повороте гироскопа положение изгибных колебаний резонатора изменяется в зависимости от угла поворота, таким образом измерение угла волны позволяет найти угол поворота резонатора в пространстве (рис.1).

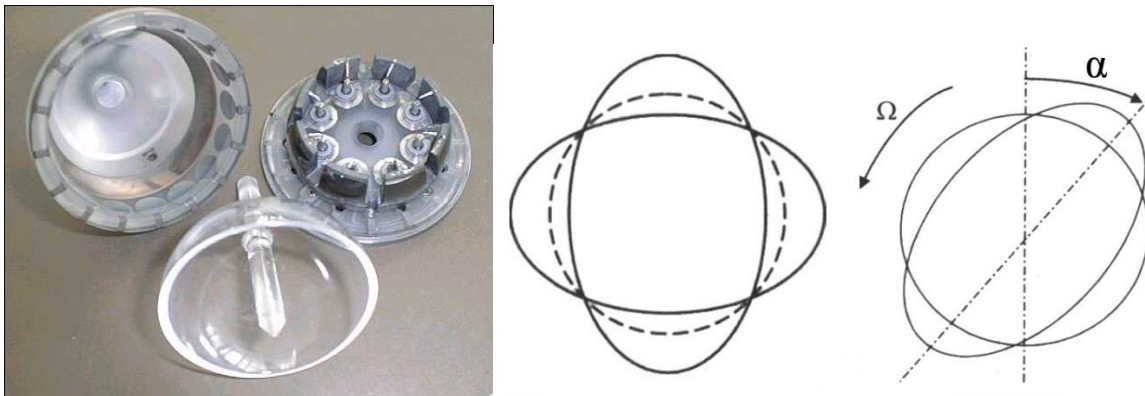


Рис.1. Пример резонатора ВТГ промышленного исполнения (слева), принцип работы ВТГ (дрейф колебаний упругих волн  $\Omega$  при повороте основания резонатора на угол  $\alpha$  относительно собственных колебаний).

Чувствительным элементом гироскопического прибора является резонатор – тонкая полусферическая оболочка, закрепленная на цилиндрическом стержне. Резонатор изготавливается из материалов, обладающих высокой изотропией и добротностью (кварцевого стекла, синтетического сапфира). Главным достоинством волнового твердотельного гироскопа является простота конструкции и точность измерений [4]. Достижение высокой точности требует, кроме использования материалов со стабильными характеристиками, высокоточной и корректной математической модели зависимости угла волны от поворота резонатора; использования надежных систем генерации, поддержания колебаний резонатора, считывания информации; постоянный контроль и коррекция метрологических характеристик прибора.

## 1.2. Микромеханические гироскопы

Под понятием “MEMS-датчик” подразумеваются различные механико-электрические или электромеханические преобразователи, размер структурных элементов которых и их перемещения в пространстве измеряется микронами. Идея создания MEMS заключается в интеграции в рамках единой кремниевой подложки структуры сравнительно малого объема ( $0,5-10 \text{ см}^3$ ), объединяющей функции датчиков, исполнительных управляющих элементов, электронных устройств сбора, анализа и контроля полученной информации [2]. На текущем этапе развития микромеханические гироскопы представлены разнообразными типами упругих подвесов чувствительной массы прибора.

При этом общий принцип работы ММГ заключается в создании поступательного или вращательного движения чувствительного элемента вдоль одной степени свободы и измерений по другой степени свободы перемещений, природа которых связана с разными физическими эффектами (в основном, эффекте Кориолиса) в поле действия угловой скорости перемещения датчика [1]. Основой таких приборов являются механические резонаторы различных конструкций – рамочные, кольцевые, полусферические, камертоны, балки и т.п.

Балочные гироскопы представляют собой один из наиболее конструктивно простых типов MEMS-гироскопов. Рабочий режим такого резонатора в общем случае предполагает генерацию с помощью пьезоэлементов колебаний вдоль одной оси консольной балки и снятие вторичных колебаний, как следствия действия силы Кориолиса, по другой взаимно перпендикулярной оси (рис.2).

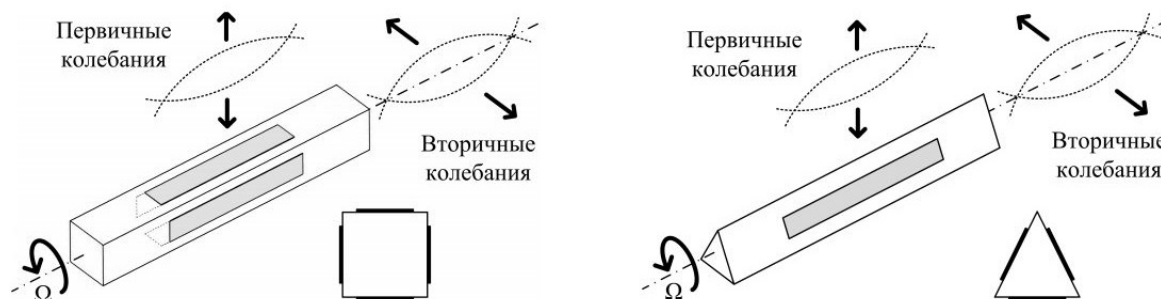


Рис.2. Схема работы балочного гироскопа при разном сечении балки

Более сложные модификации балочных резонаторов используют склеенные биморфные поляризованные в разных направлениях металлические пластины (например, в гироскопах GYROSTAR фирмы Murata, БВГ-500 фирмы “Элпа”). Использование в чувствительном элементе балочного гироскопа пьезоэлементов с нестабильными температурными параметрами является главной причиной снижения точности таких датчиков, хотя последние разработки (XV-3500CB, “Epson-NGK Insulators”) позволяют достичь приемлемой температурной стабильности [6].

Среди MEMS-гироскопов широкое распространение получили вибрационные резонаторы камертонного и кольцевого типов. В качестве классического примера камертонного датчика перемещений можно назвать одноосный гироскоп Драперовской лаборатории (США) (рис.3.).

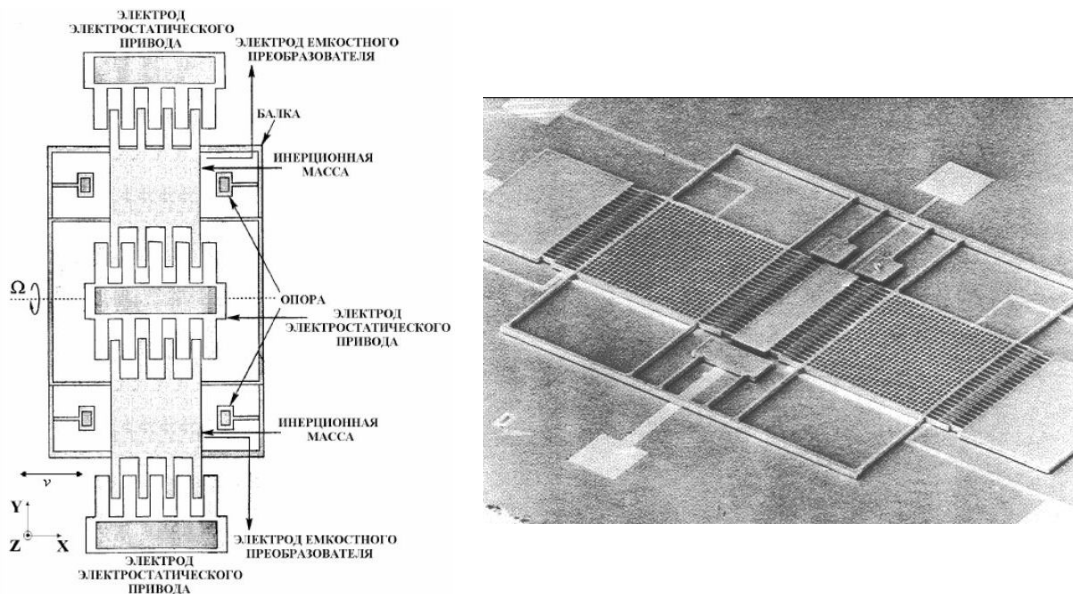


Рис.3. Схема (слева) и увеличенный снимок резонатора MEMS-гироскопа Драперовской лаборатории (справа)

Инерционные массы данного гироскопа приводятся в колебательное движение в плоскости, параллельной подложке при помощи электростатических приводов. Вращение прибора вокруг оси  $x$  вызывает противофазные колебания инерционных масс относительно неподвижной подложки, пропорциональные угловой скорости перемещения и регистрируемые емкостными преобразователями датчика. Среди проблем гироскопических резонаторов камертонного типа следует отметить сложности в создании датчика регистрации перемещений в плоскости  $z$  (перпендикулярной подложке датчика) и подверженность влиянию сильных линейных нагрузок.

Микромеханическим датчикам кольцевого типа, при достаточно простой реализации, свойственны высокие в своем классе точностные характеристики, а также стойкость к внешним нагрузкам [3]. При работе гироскопа в кольцевом резонаторе возбуждаются первичные колебания высокой частоты (единицы-десятки кГц), имеющие форму стоячей волны. При отсутствии радиальных угловых движений кольцо приобретает эллиптическую форму с симметричным положением точек пучностей (рис.4).

При вращении гироскопического датчика относительно оси, перпендикулярной плоскости чувствительного элемента, момент сил инерции Кориолиса вызывает вращение (прецессию) стоячей волны относительно кольцевого резонатора. Деформация кольца приводит к нарушению симметричности точек пучности и вызывает радиальное движение вторичных снимающих преобразователей (рис.5). Определяя по величине перемещений вторичных снимающих преобразователей текущее положение стоячей волны относительно кольцевого резонатора, можно получить информацию о значении угловой скорости, и, соответственно, угле поворота датчика гироскопа в инерциальной системе. Принцип волнового твердотельного гироскопа кольцевого типа широко используется многими компаниями-производителями микромеханических компонент [6]. Одним из возможных примеров такого типа MEMS-датчика угловых параметров являются микромеханические приборы компании Silicon Sensing (рис.6).

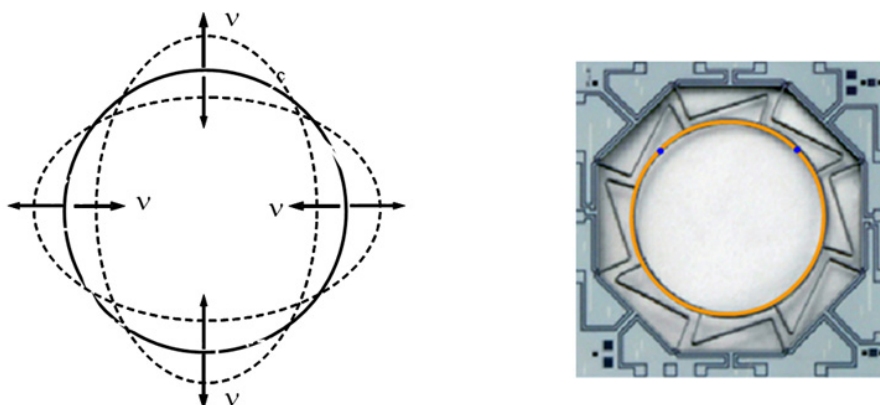


Рис.4. Схема работы (слева) и изображение (справа) волнового гироскопа кольцевого типа при отсутствии угловых перемещений. Желтой линией выделен контур чувствительного элемента, синие точки – пучности стоячей волны

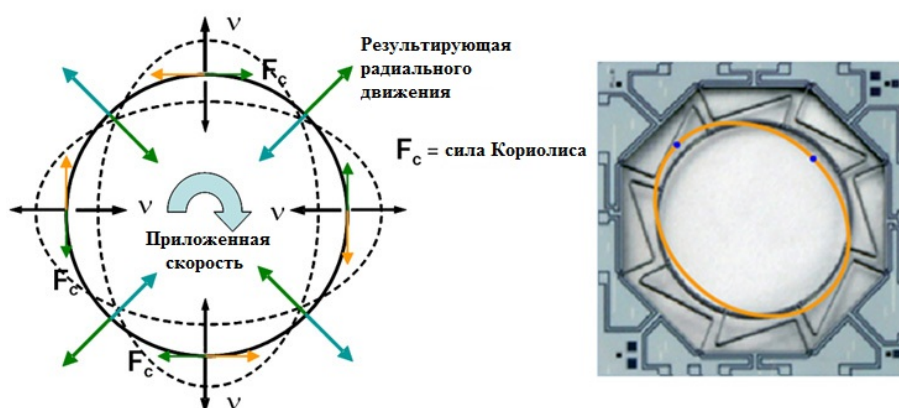


Рис.5. Схема работы (слева) и изображение (справа) волнового гироскопа кольцевого типа при наличии угловых перемещений относительно оси, перпендикулярной плоскости чувствительного элемента. Желтой линией выделен контур чувствительного элемента, синие точки – пучности стоячей волны

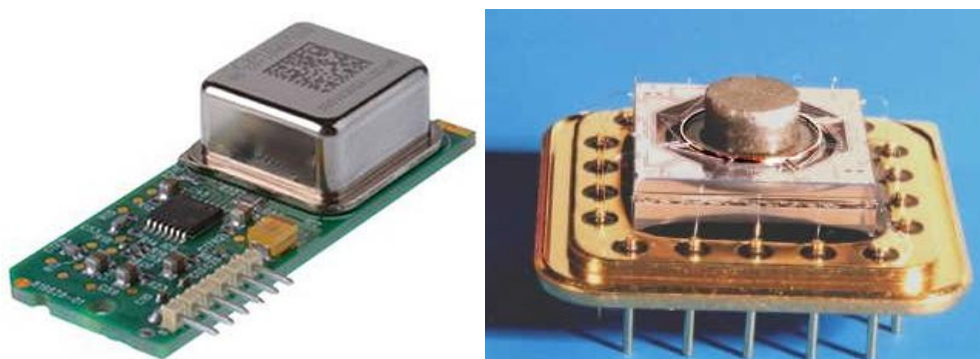


Рис.6. Волновой твердотельный микромеханический гироскоп кольцевого типа CRS05 (Silicon Sensing) – общий вид (слева) и вид чувствительного элемента при снятой защитной крышке (справа)

## ВЫВОДЫ

Проблема выбора оптимального датчика измерения угловых параметров для решения конкретной прикладной задачи достаточно не проста. Интенсивное развитие в последние годы технологии микромеханических интегрированных компонент открыло возможность разработки и внедрения MEMS-датчиков контроля пространственных перемещений с чувствительными элементами различных типов и модификаций. Не отрицая их очевидные преимущества (малый вес, габариты, низкий уровень потребления энергии) на фоне тенденции снижения цен на данные решения, следует отметить преимущественно невысокие параметры точности, а также существенную подверженность факторам внешней среды. Узкоспециализированные MEMS-гироскопы среднего и высокого класса точности на сегодняшний день не редкость, однако их стоимость в десятки-сотни раз превышает цену компонент “массового сегмента”. Обратить внимание стоит также на сложность технологического процесса разработки и изготовления микромеханических датчиков угловых скоростей и ускорений. Потенциально достижимые характеристики точности волновых твердотельных гироскопов достаточно высоки, однако требуют решения ряда проблем технологического и методического характера. Достаточно существенные массогабаритные параметры и энергопотребление ВТГ в совокупности с ограниченными возможностями их уменьшения без потери точности сужают область применения таких приборов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андрущенко В. А., В. Н. Курганский В. Н., Зражевский Г. М., Тишаев И. В., Бугрий В. Г., Петрук В. Н. Практические результаты лабораторных и скважинных испытаний автономного инклинометра на основе микромеханических гироскопов волнового типа // Геоінформатика. – Київ: Центр менеджменту та маркетингу в галузі наук про Землю ІГН НАН України. – 2014. – №1(49). – С.25–37.
2. Коноплев Б. Г. Компоненты микросистемной техники. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 117 с.
3. Крысько А. В., Ярошенко Т. Ю., Жигалов М. В., Мицкевич С. А., Крысько В. А. Нелинейная динамика вибрационных микромеханических гироскопов. Часть 1. Обзор исследований. – Вестник СГТУ. – 2012. – 2(65), вып. 1. – С.18–24
4. Лысов А. Н. Винниченко Н. Т., Лысова А. А. Прикладная теория гироскопов. Часть 3. – Издательский центр Челябинск: ЮУрГУ, 2009. – 86 с.
5. Распов В. Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007. – 399 с.
6. Шахнович И. МЭМС-гироскопы – единство выбора // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2007. – № 1. – С. 76–85.