

# МЭМС - Гироскопы



Ригоев Иван  
Петрозаводск

2017

# Акселерометр и Гироскоп

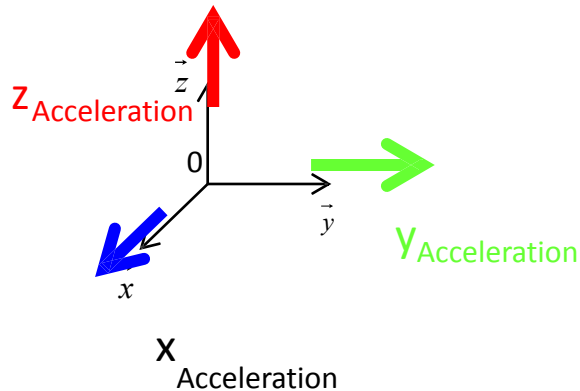
Акселерометр измеряет линейное ускорение

Гироскоп измеряет угловое перемещение

Акселерометр и

Ньютон  $F = m$

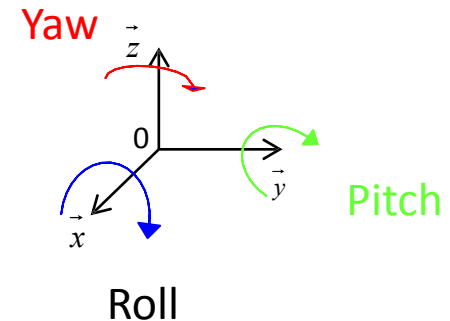
A



Гироскоп и

Корис  $\vec{v} \times \vec{\omega}$

$F = - m \vec{v} \times \vec{\omega}$



МЭМС акселерометр и гироскоп объединены в отдельный модуль -

IMU (Inertial Measurement Unit)

# Применение



- Игровые консоли и смартфоны.
- Стабилизация изображения в фото и видеокамерах.
- Расширение GPS-решений (системы счисления пройденного пути).
- Системы управления движением в робототехнике.
- Стабилизация и контроль платформ промышленного оборудования.
- ВПК (ракеты, БПЛА, машины).
- Подслушивание разговоров

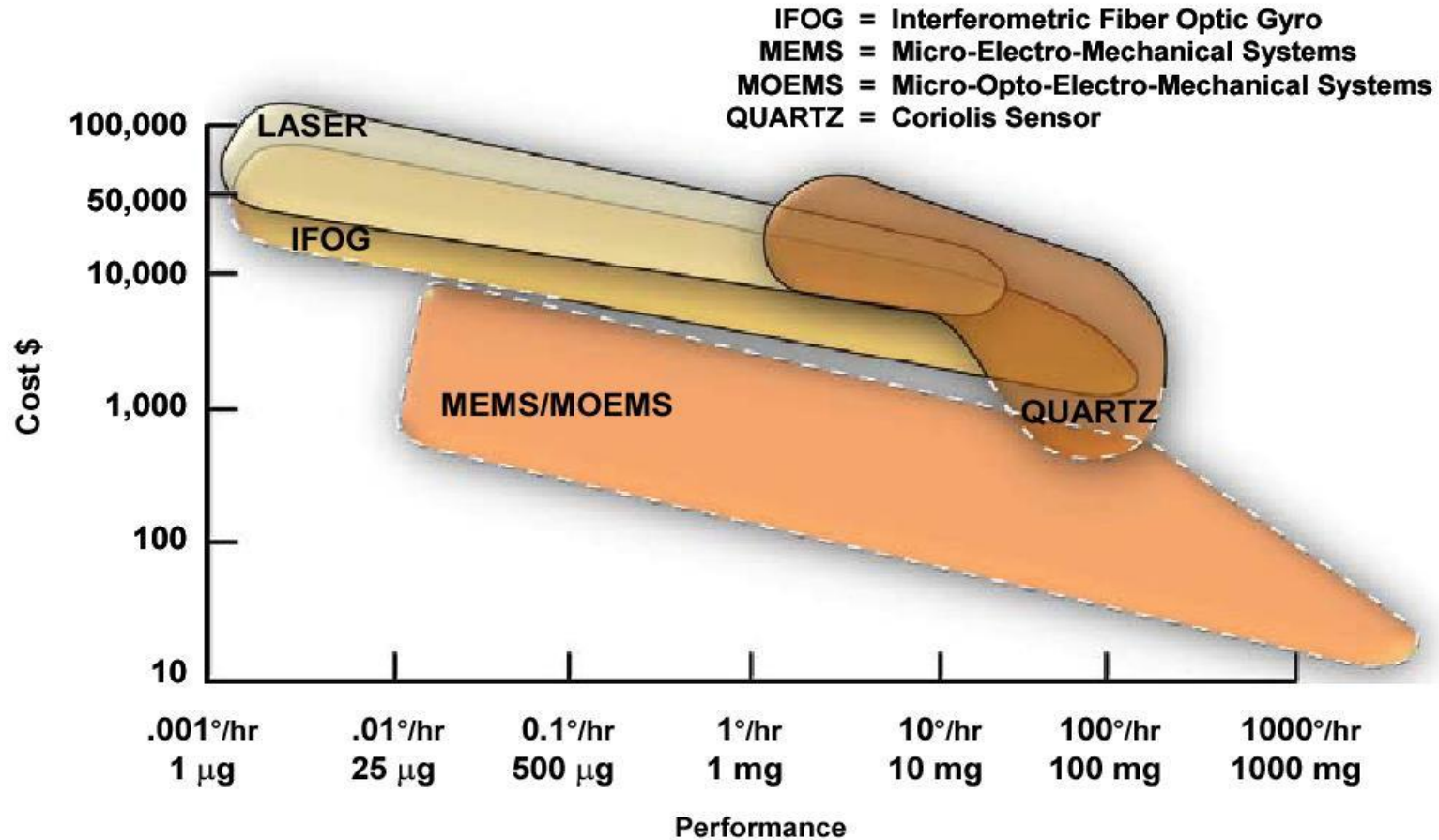


# Сравнение параметров инерциальных систем

**КЛГ- кольцевые лазерные гироскопы**

**ВОГ – волоконно оптические гироскопы**

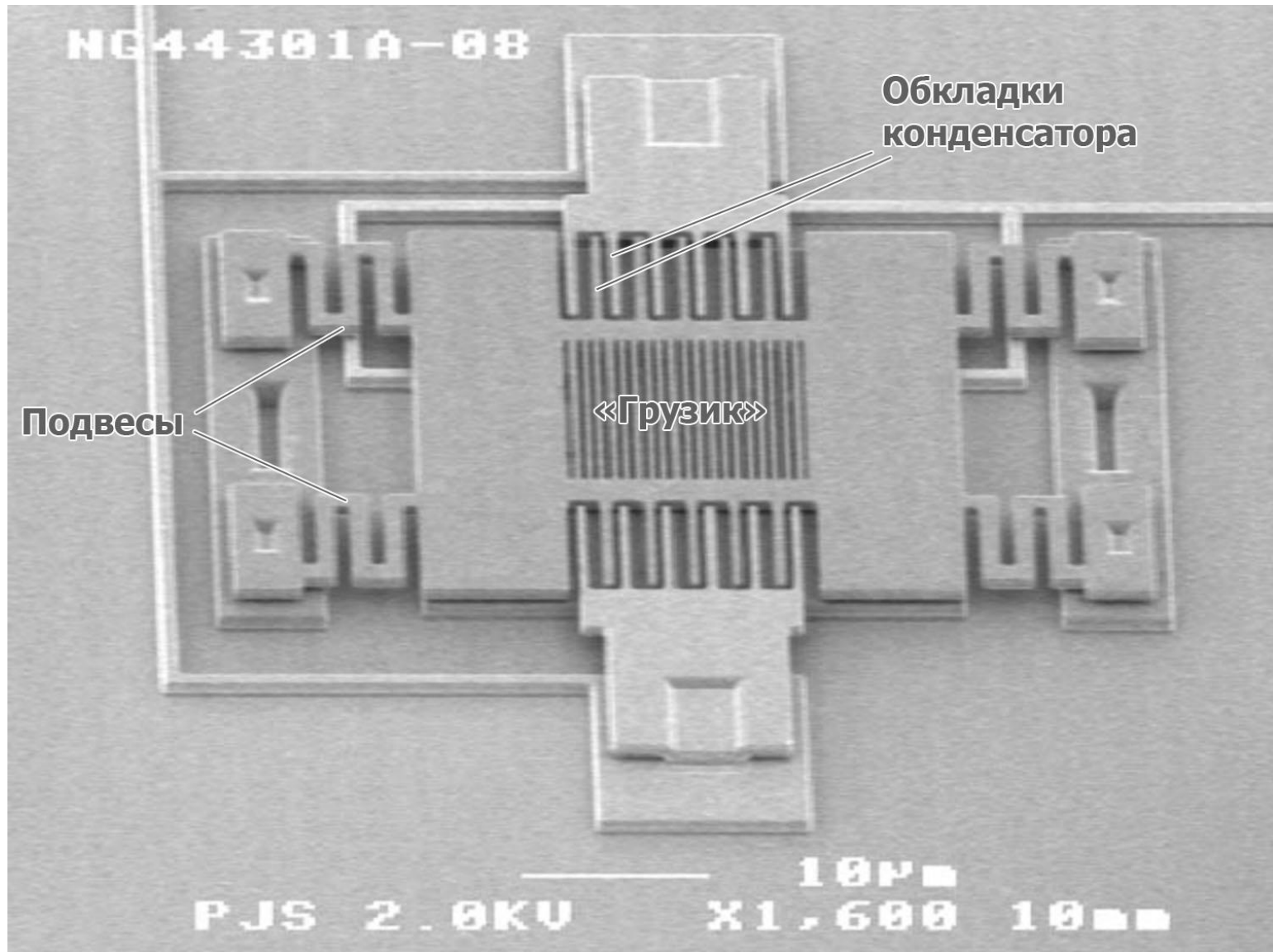
**МЭМС/ МОЭМС (НЭМС) – микро (опто) механические системы**



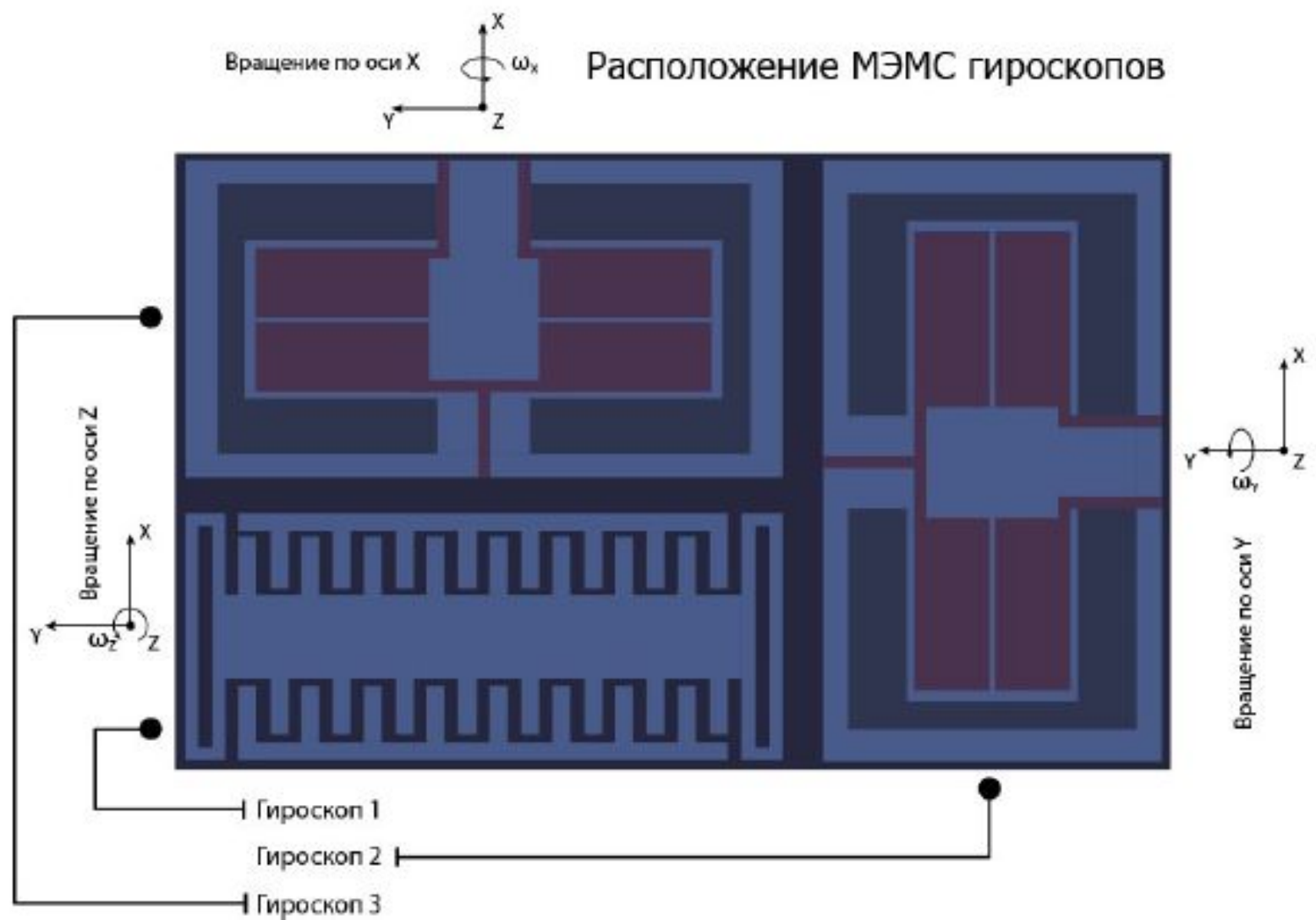
**Характеристики: 1- дрейф угловой скорости, °/час (гироскопы);**

**2- погрешность, mg (акселерометры)**

# Варианты реализации

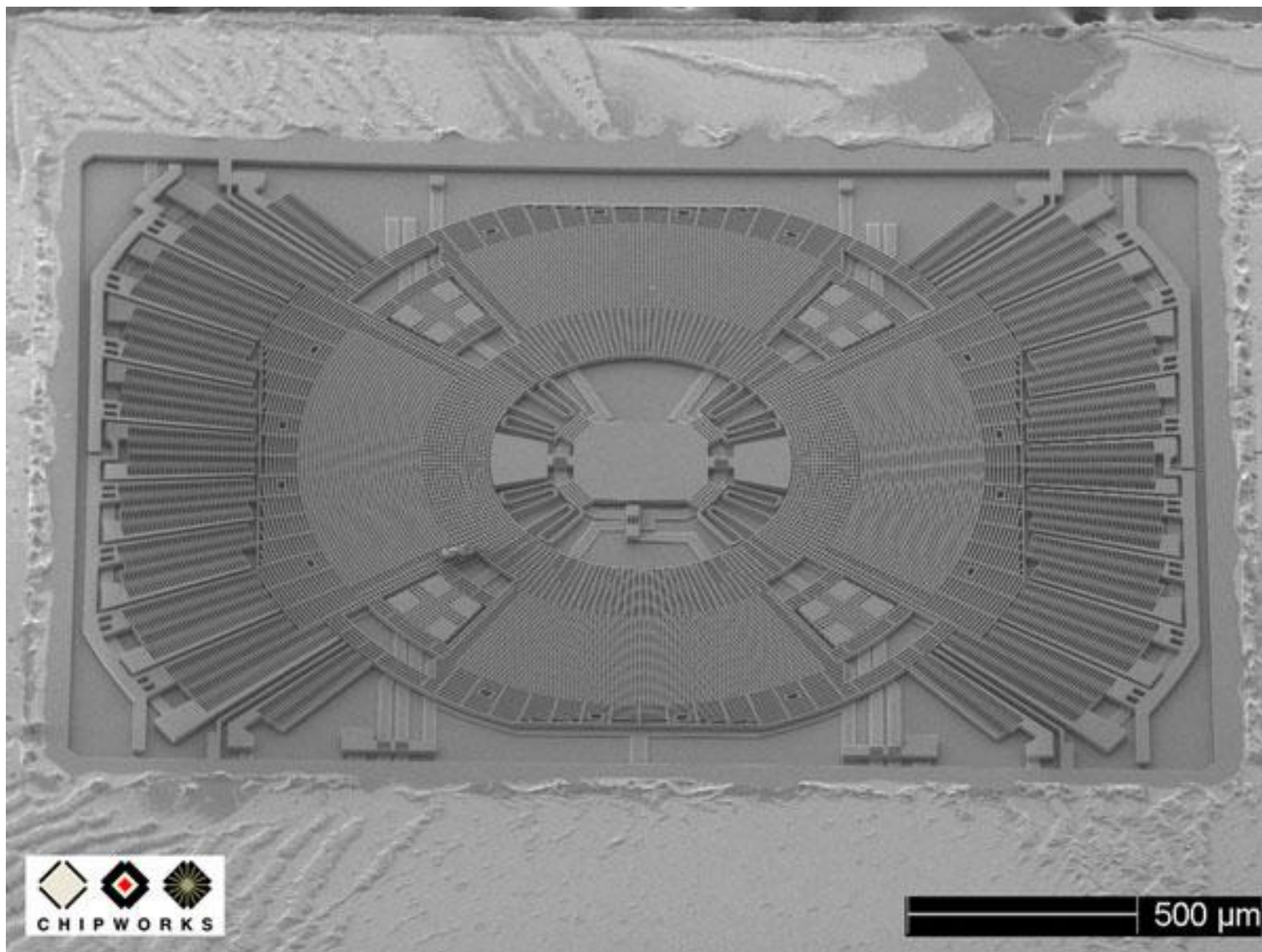


# А как сделать трехосевой?

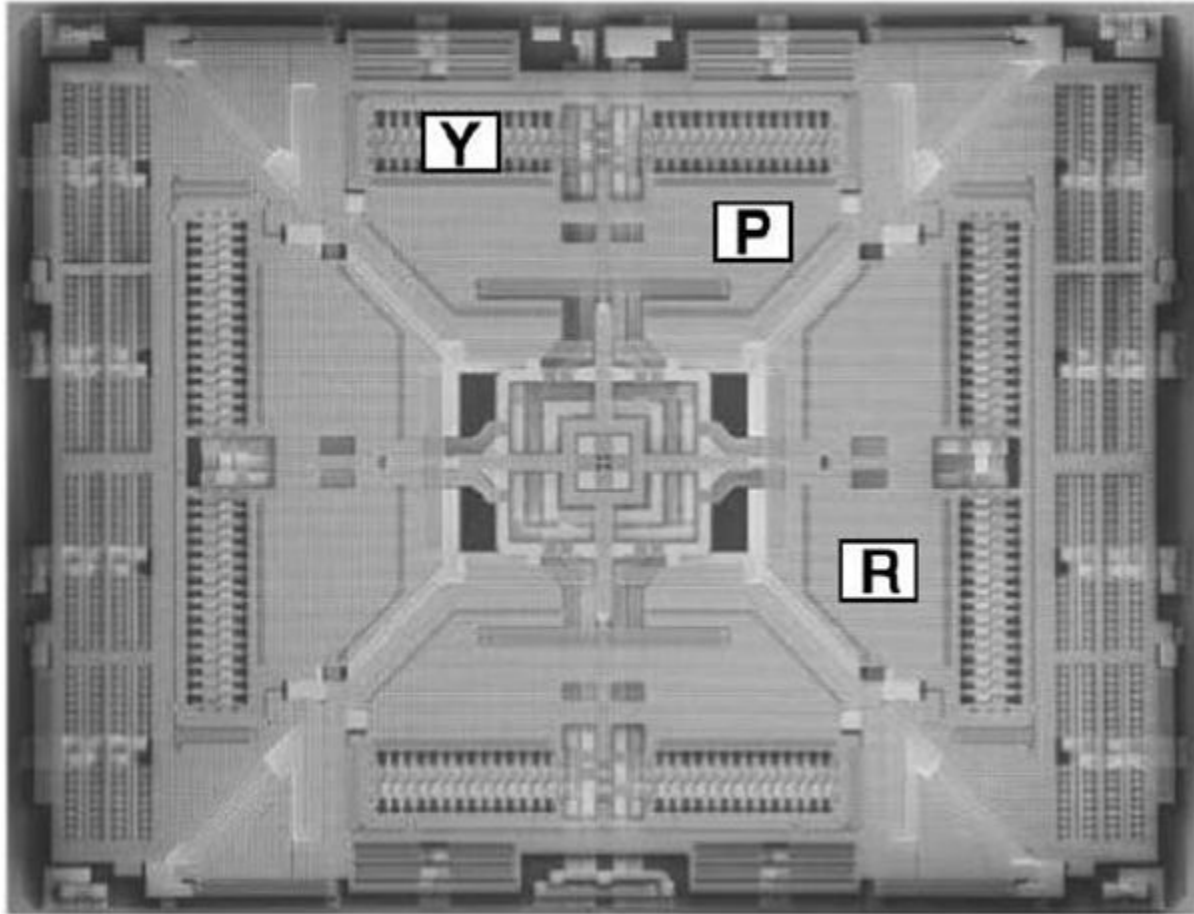




# Варианты реализации



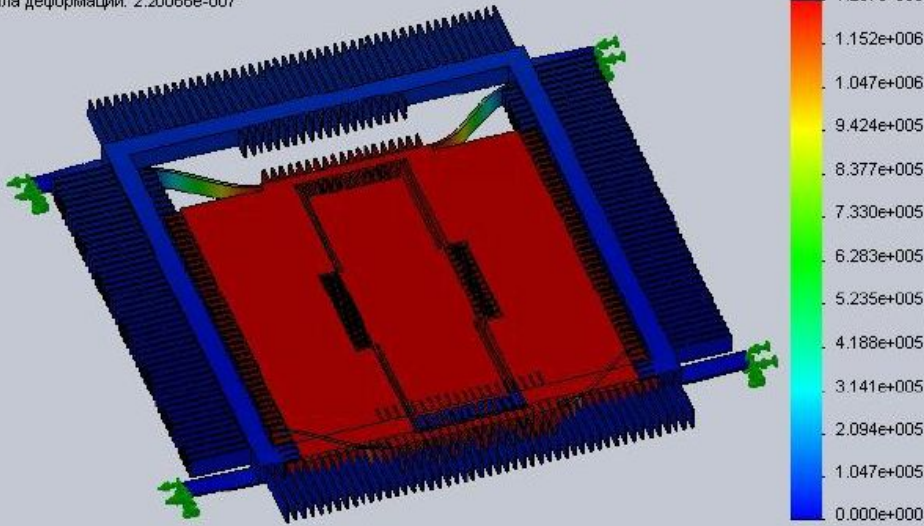
# Внутренняя структура гироскопа



- **Рыскание (Yaw)** – вращение вокруг вертикальной оси (ось Z)
- **Крен (Roll)** – вращение вокруг продольной оси (ось X)
- **Тангаж (Pitch)** – вращение вокруг поперечной оси (ось Y)

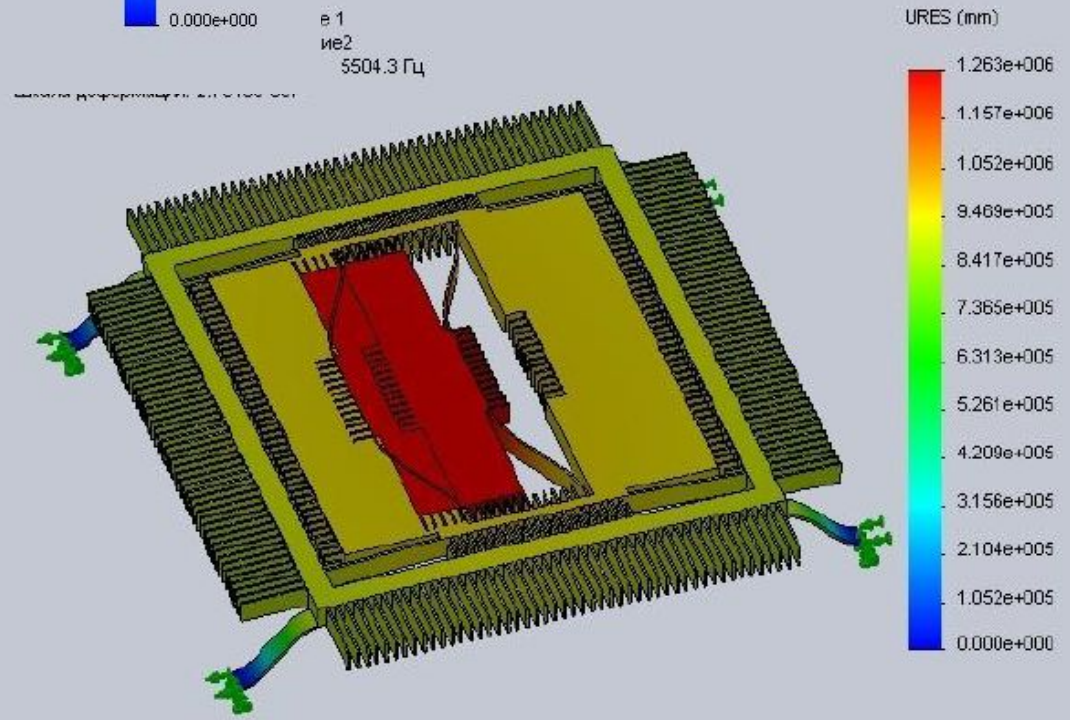


Имя модели: Деталь1  
Имя исследования: Исследование 1  
Тип элюры: Частотный Перемещение1  
Форма колебаний: 1. Значение = 5448.5 Гц  
Шкала деформации: 2.20066e-007

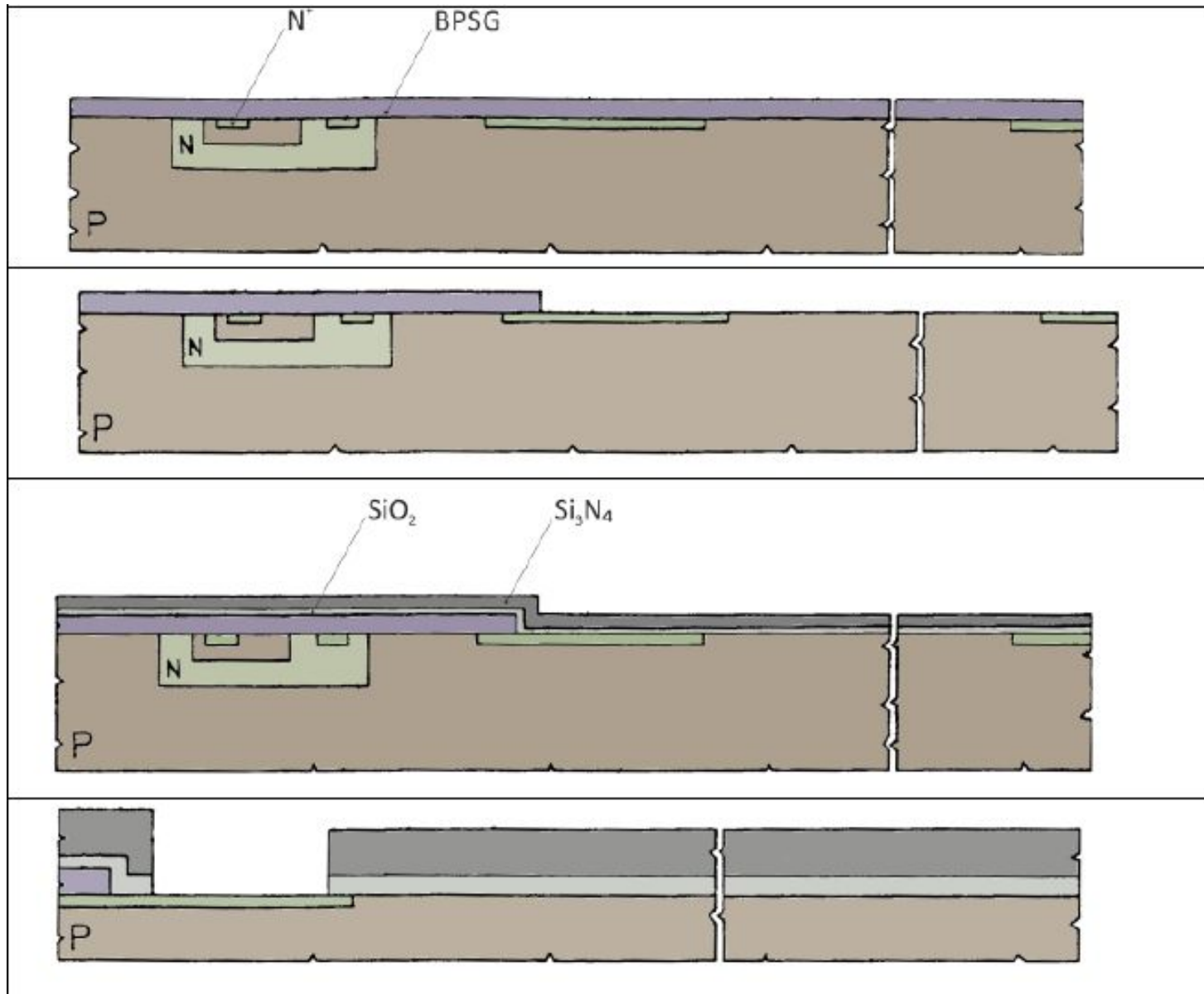


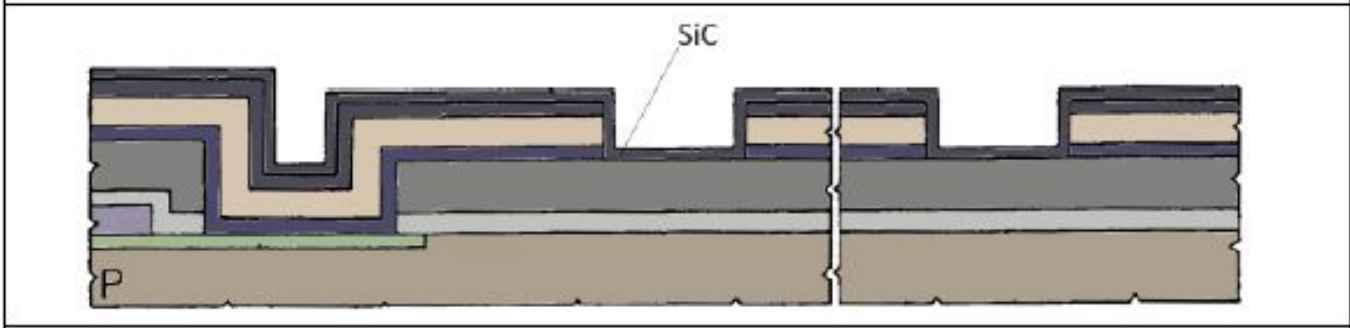
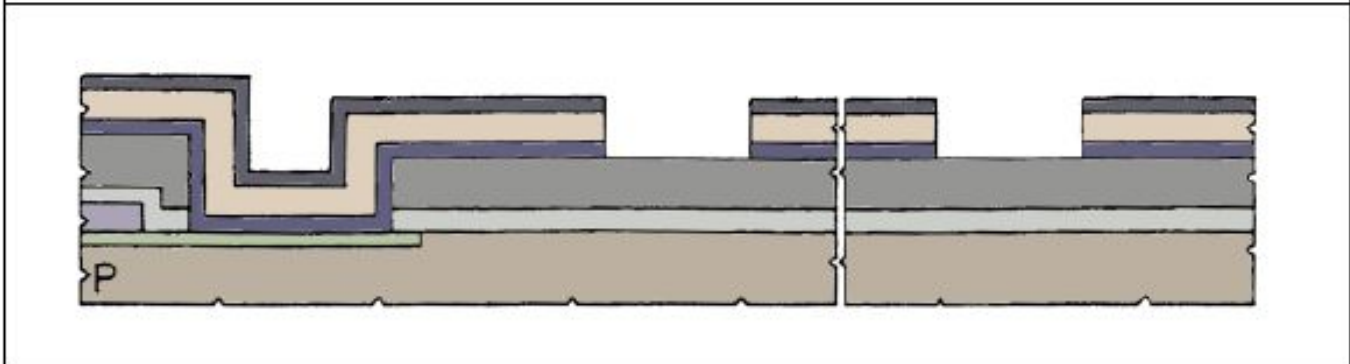
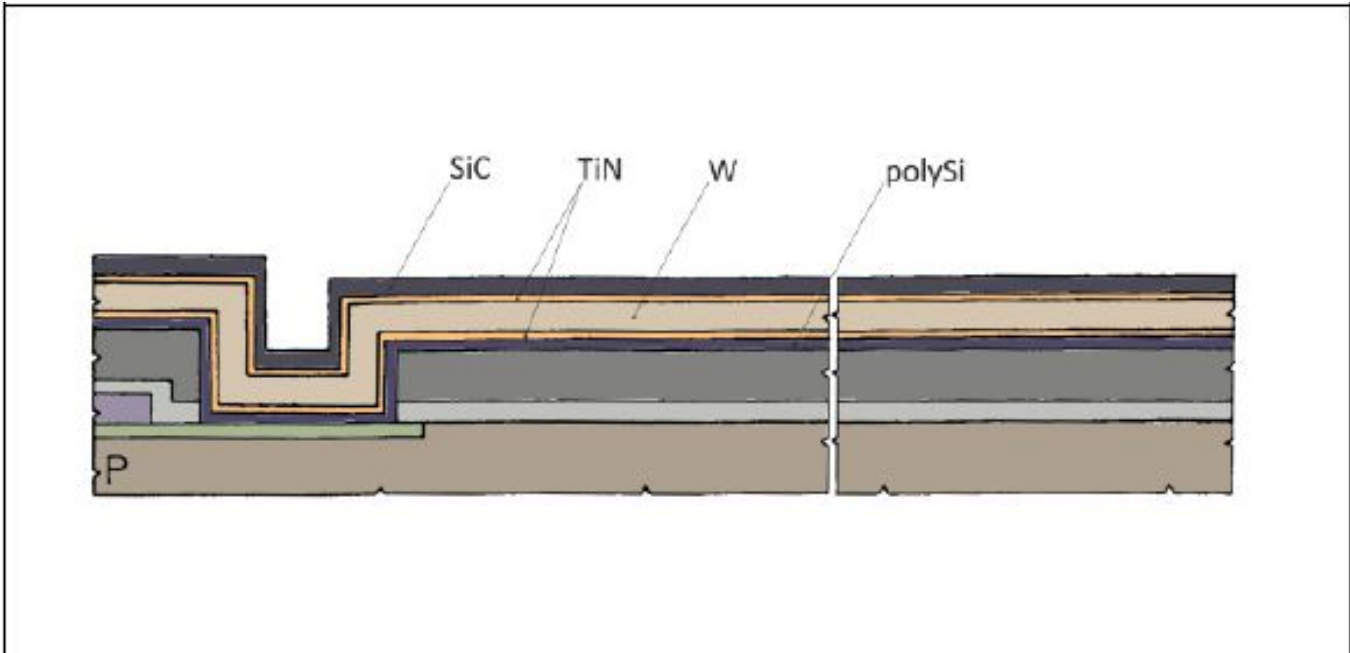
Информативные  
колебания гироскопа  
вдоль оси Y

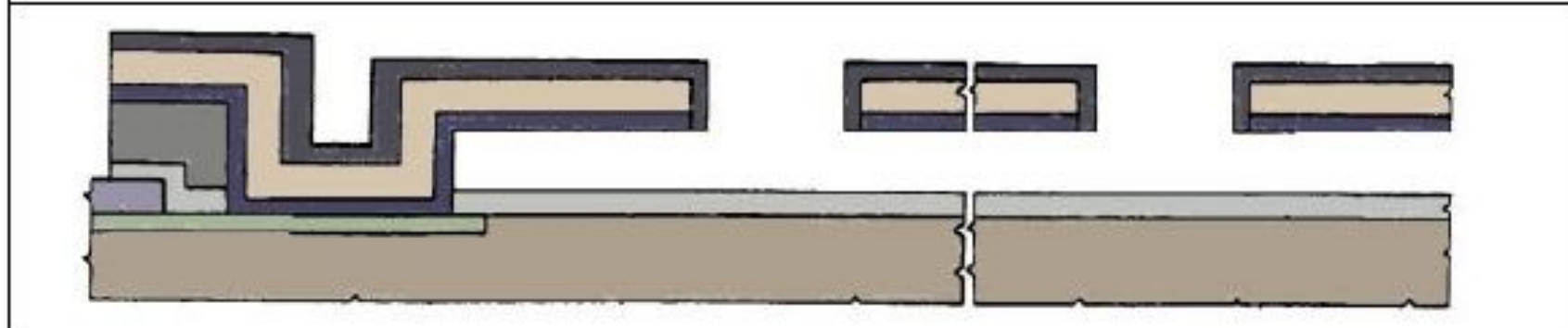
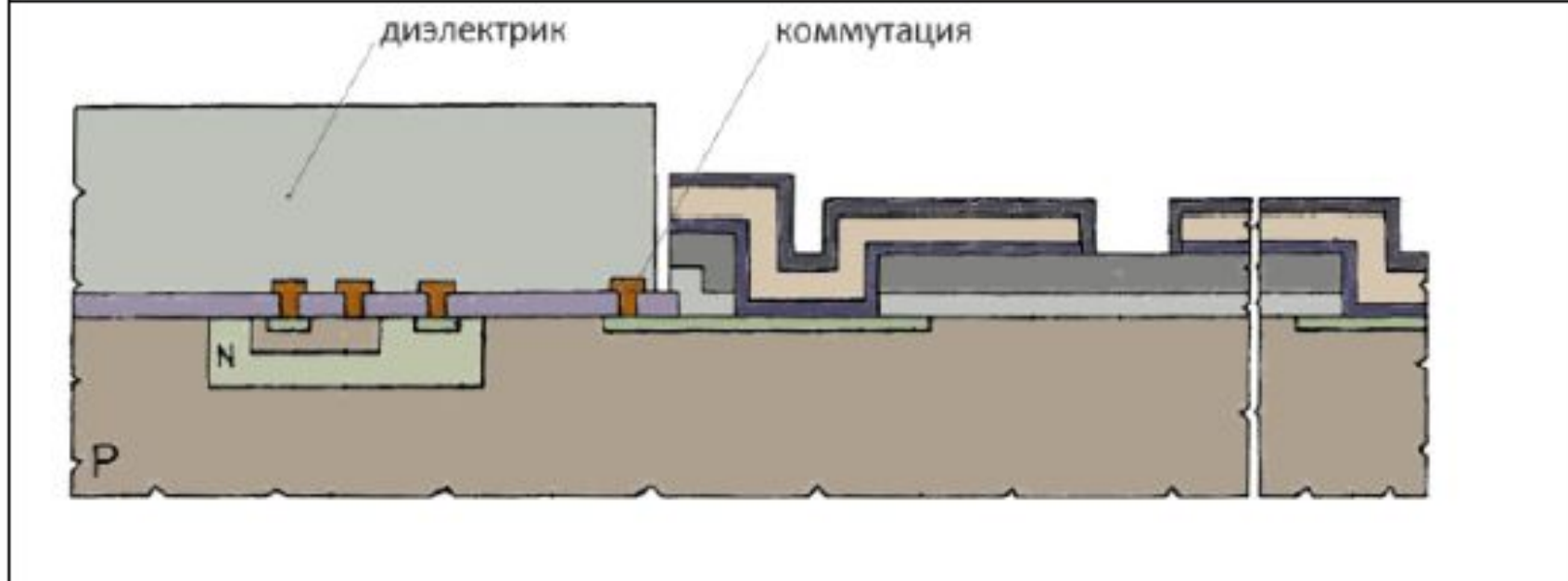
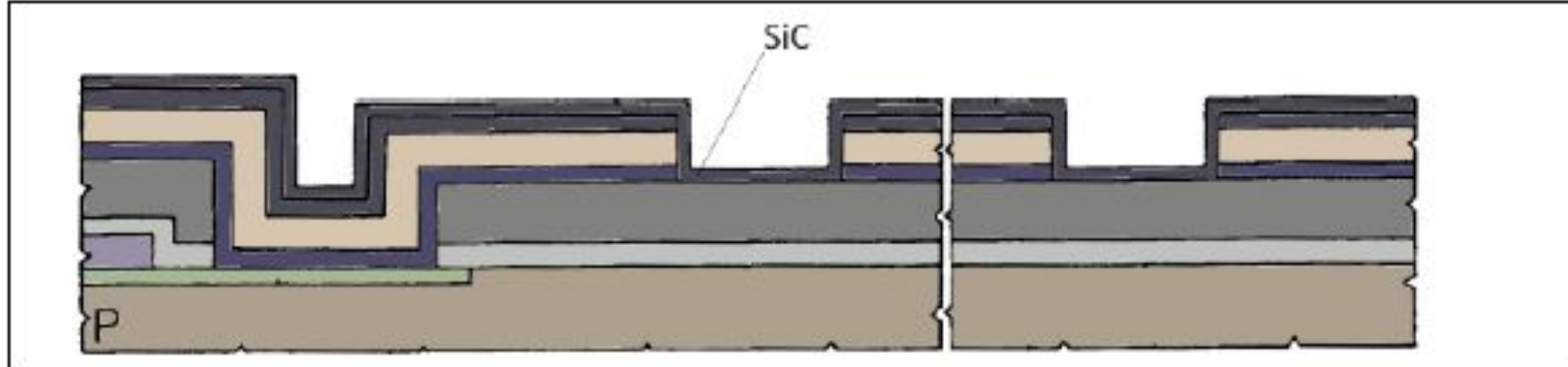
Информативные  
колебания гироскопа  
вдоль оси X и первичные  
колебания вдоль оси Z



# Как сделать гироскоп?



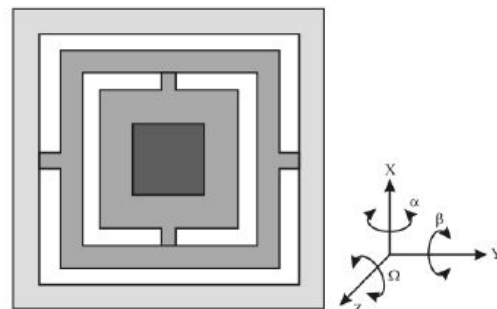




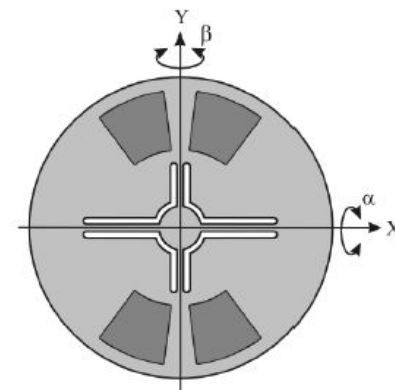




a)



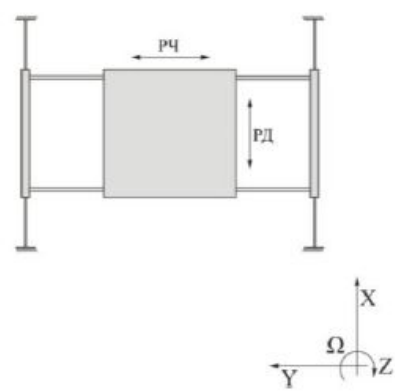
b)



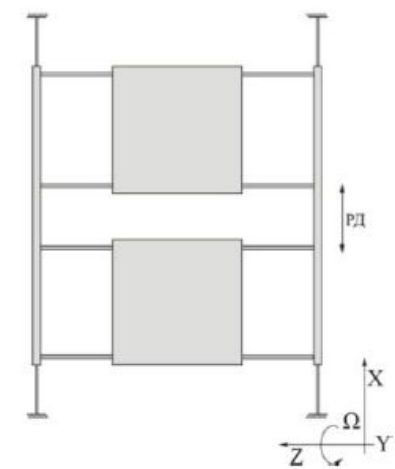
Базовые расчетные схемы ММГ RR – типа:

a) рамочный; б) роторный

a)



b)



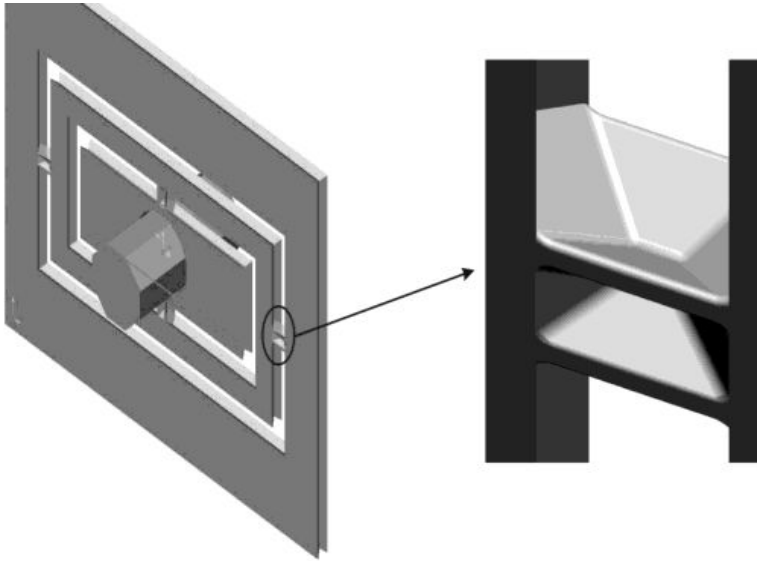
Базовые расчетные схемы ММГ LL-типа

a) с одной инерционной массой; б) с двумя инерционными массами



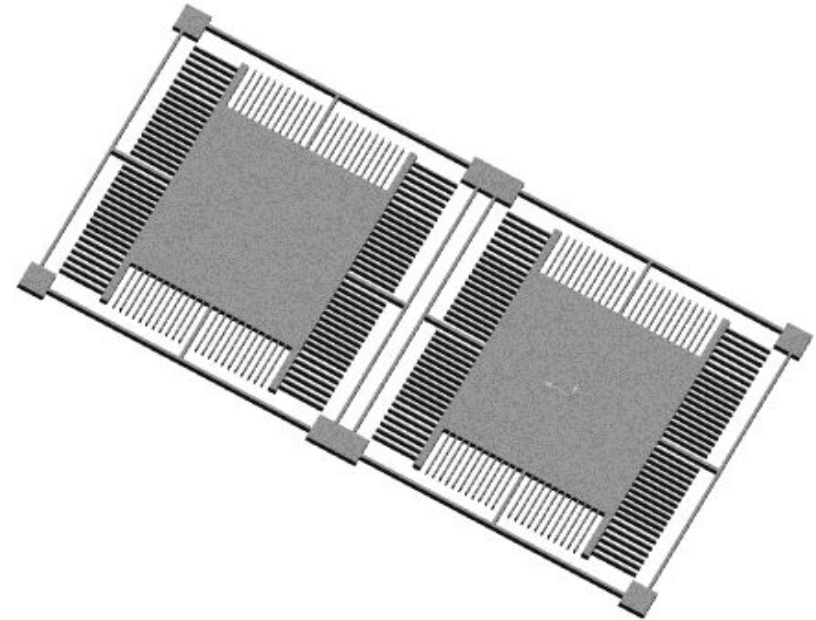
# Подвесы с сосредоточенными параметрами

## R-R тип

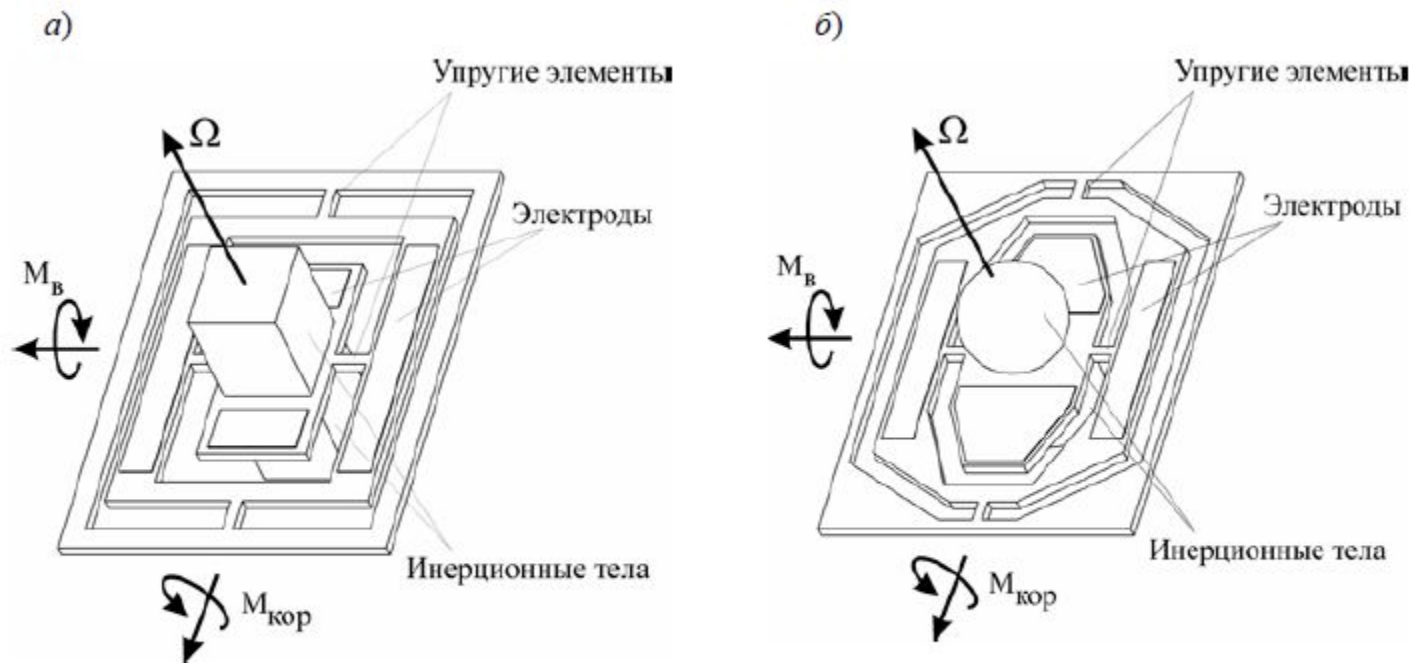


**Достоинства:** высокая добротность колебательного контура и высокая жесткость по паразитным степеням свободы, высокая чувствительность.  
**Недостатки:** высокие требования к точности сведения резонансных частот

## L-L тип

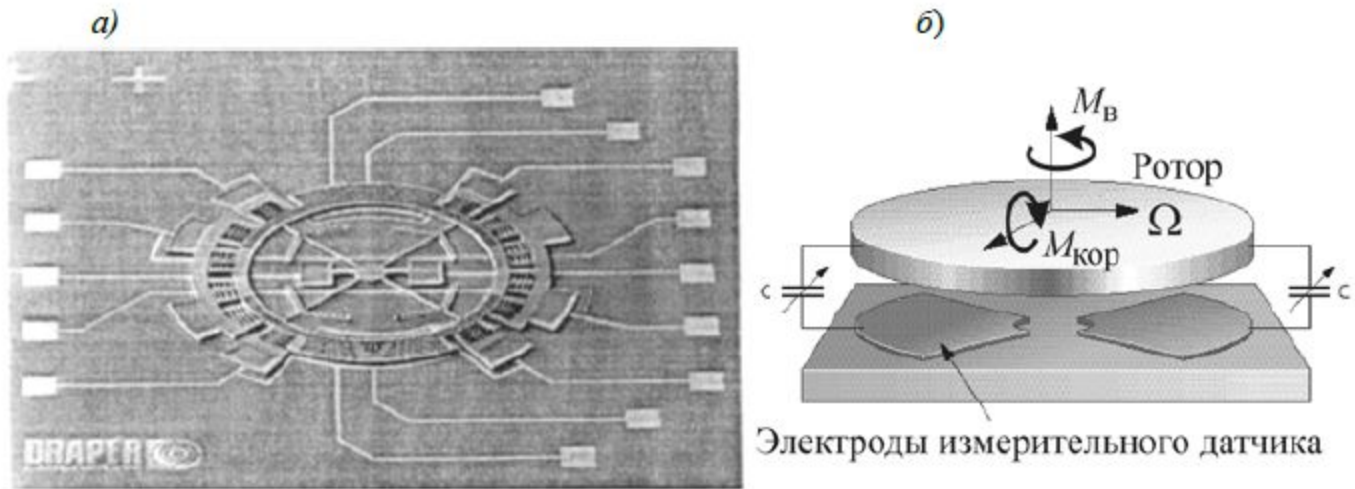


**Достоинства:** относительная простота и стабильность тех.процесса .  
**Недостатки:** слабая устойчивость к внешним возмущениям



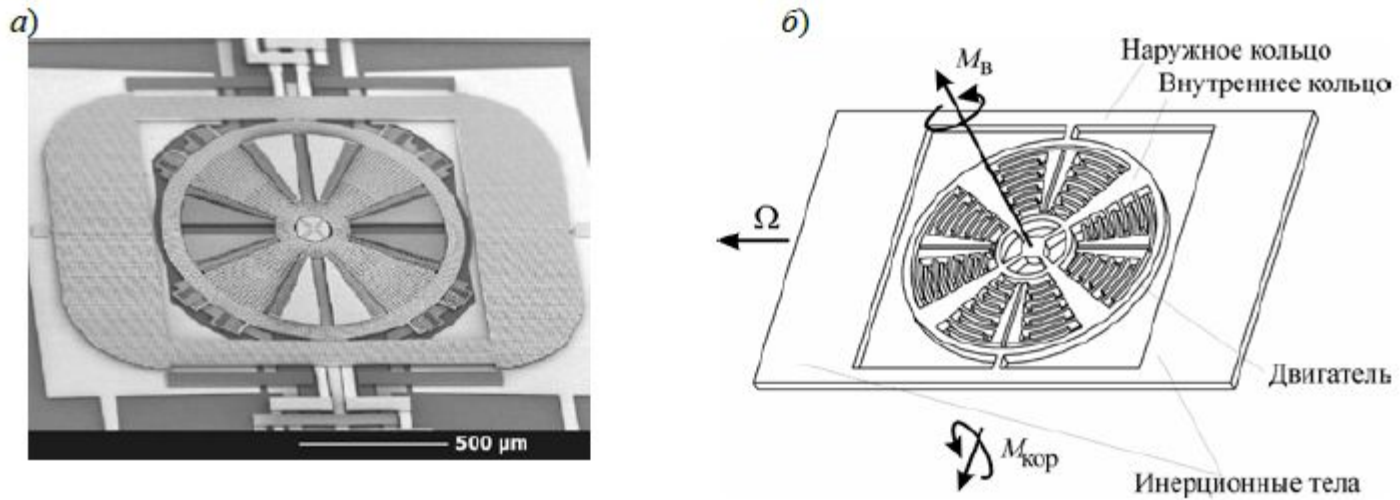
Конструкции с наружными кардановыми подвесами:  
 а) *Draper Laboratory* (США), б) *EADS, LG-MX Microsystems* (Германия)

Недостатки: необходимость применения сборочных операций для закрепления инерционных масс, что значительно усложняет технологический процесс сборки и изготовления ММГ.



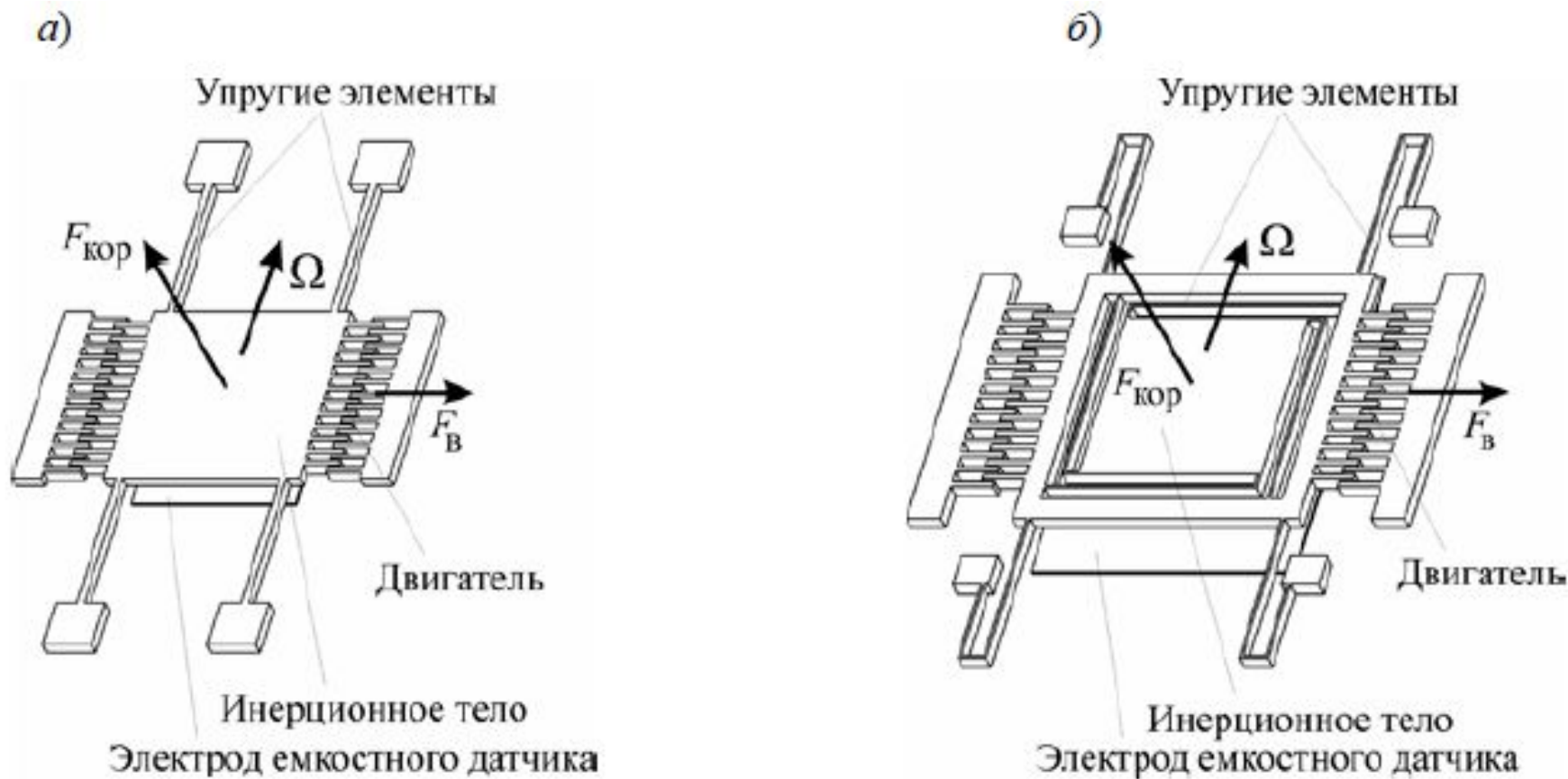
Гирискоскоп в виде диска *Draper Laboratory* (США):

a) общий вид; б) принципиальная схема



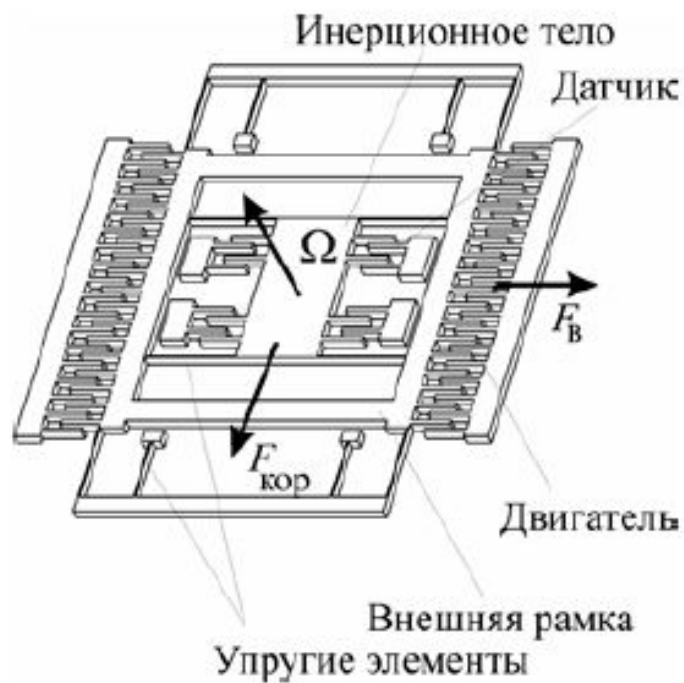
Микромеханический гирискоскоп MARS-RR:

a) общий вид гирискоскопа; б) принципиальная схема

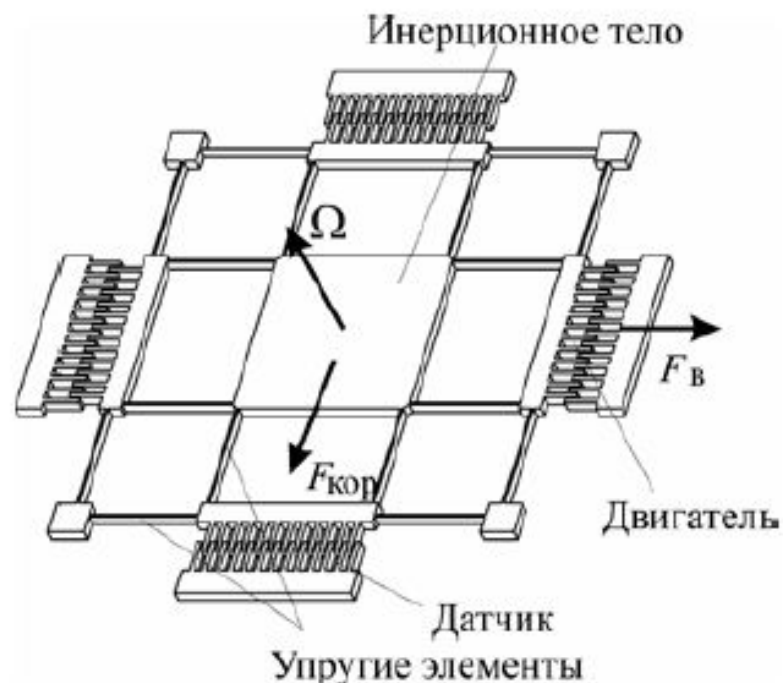


Конструкции стержневых подвесов с поступательными движениями:  
 а) *Toyota Central Research* (Япония); б) *Murata Manufacturing* (Япония)

a)



б)

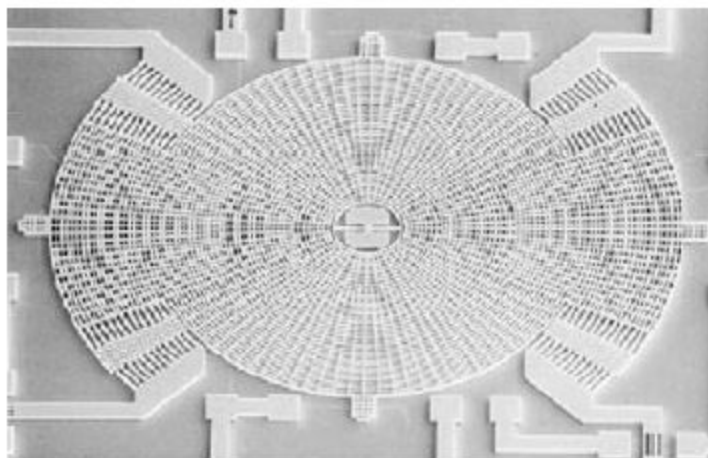


Конструкции с осью чувствительности, перпендикулярной плоскости гироскопа:

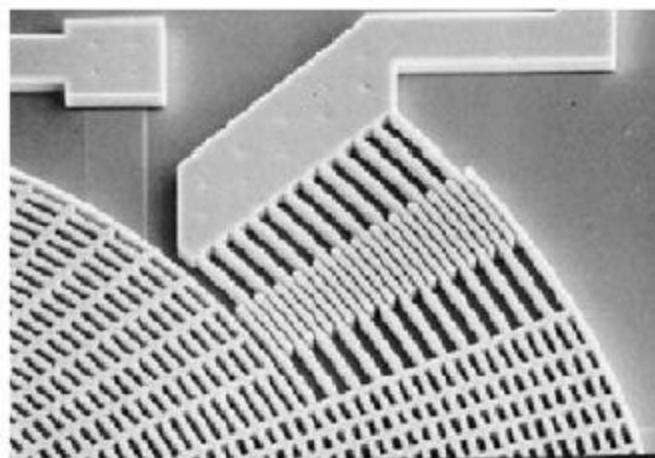
a) *HSG-IMIT* (Германия); б) *Carnegie Mellon University* (США)



a)



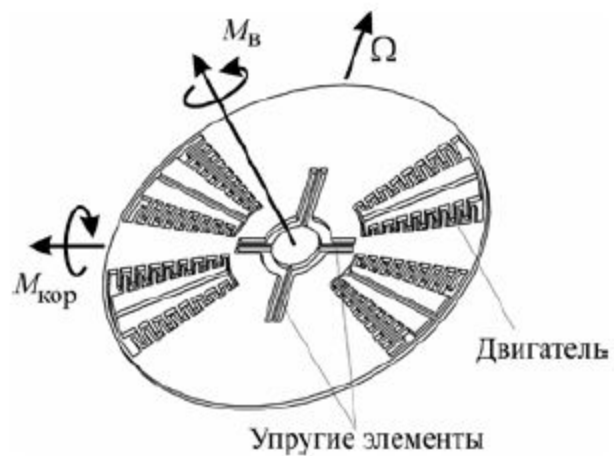
б)



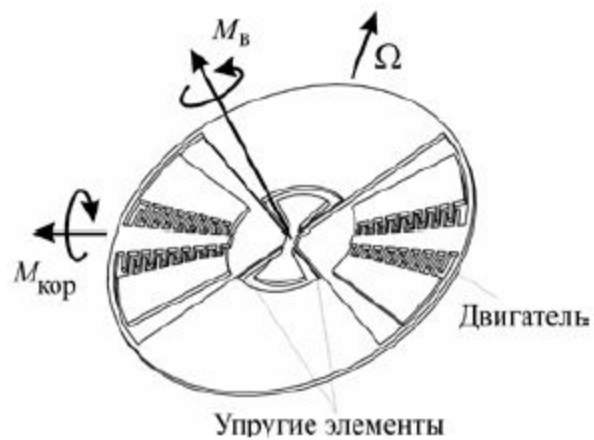
Разработка гироскопа фирмы *Bosch GmbH* (Германия):

а) общий вид, б) «гребенчатый» двигатель

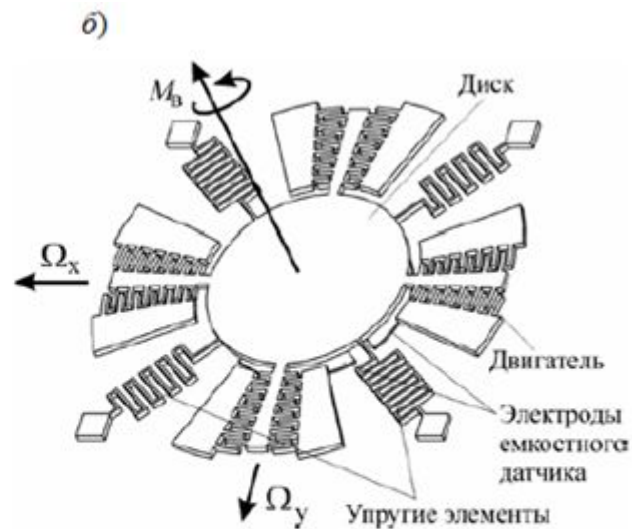
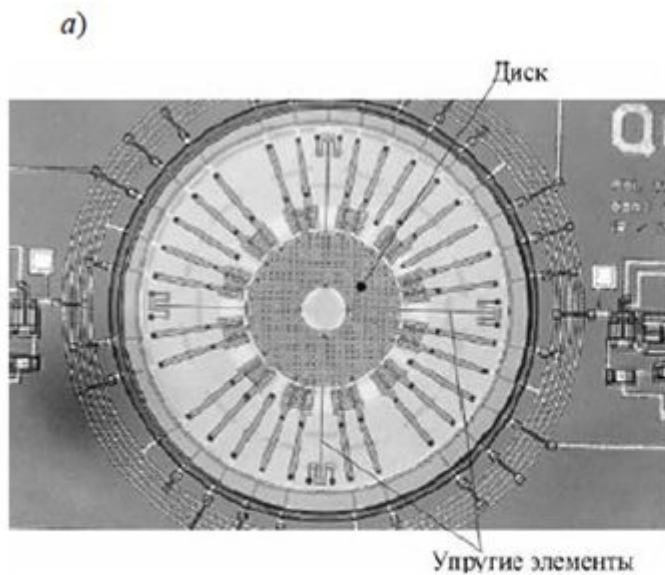
a)



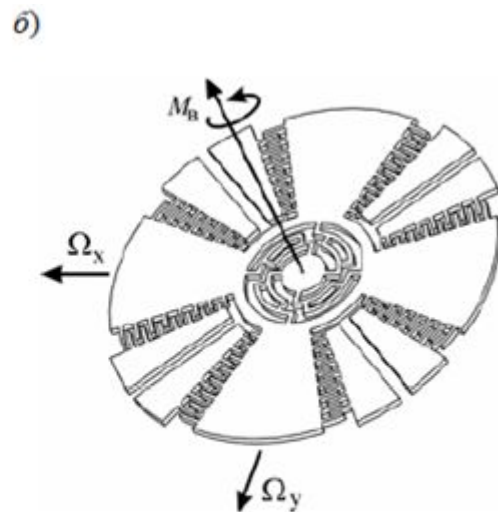
б)



Конструкции отечественных одномерных ММГ:  
а) ЦНИИ «Электроприбор», б) ЗАО «Гирооптика»

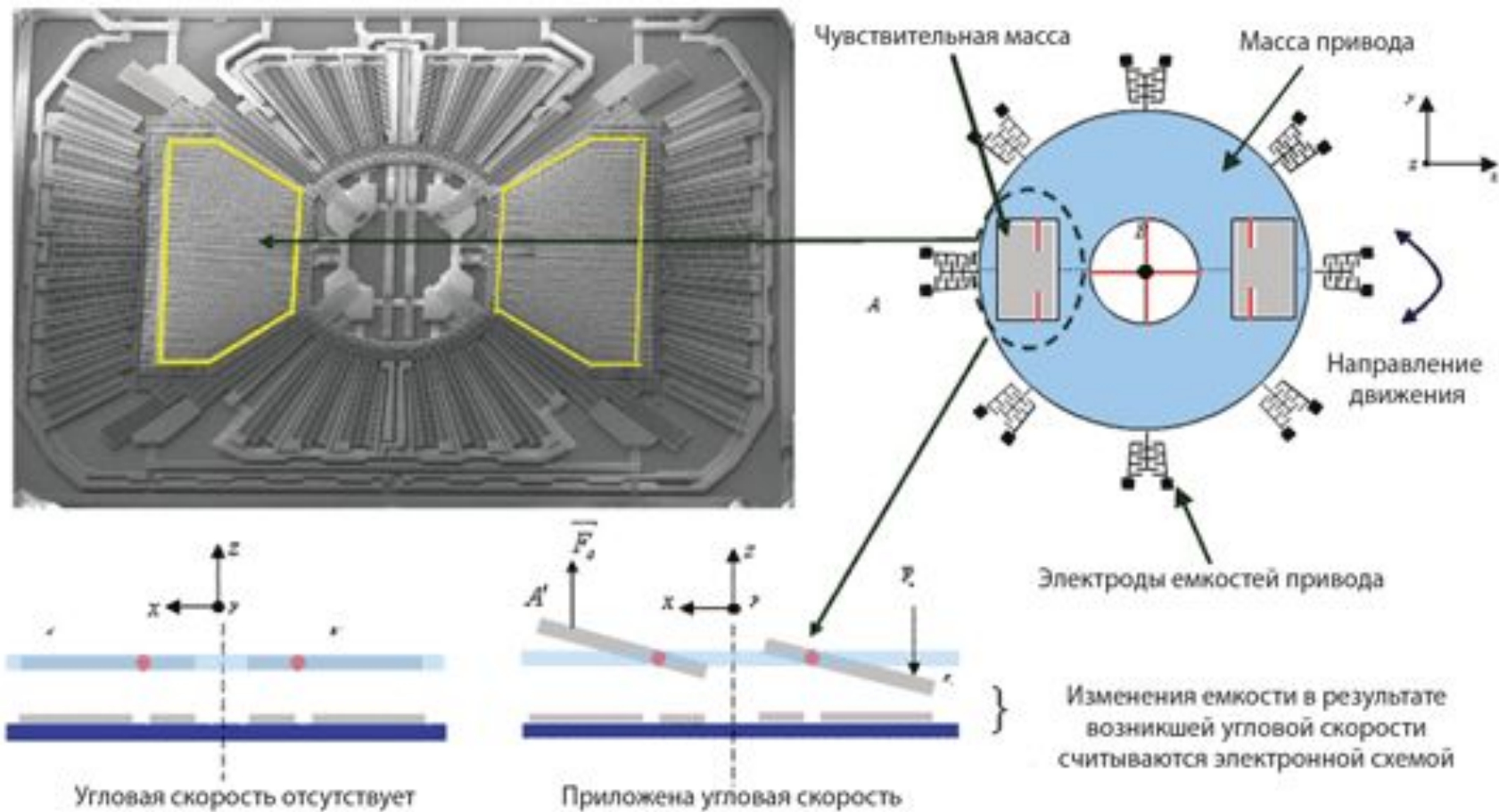


Конструкции двумерных ММГ с наружным подвесом:  
 а) Университет *Berkeley* (США), б) Институт технологии *Himeji* (Япония)



Конструкции двумерных ММГ с внутренним подвесом:  
 а) университет *Berkeley* (США), б) университеты *С.-Петербург* (Россия)

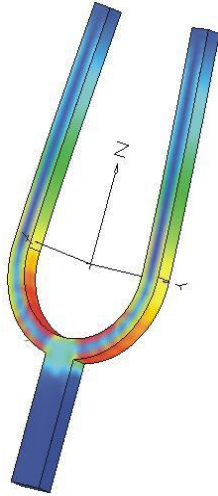
# Поняли как работает?



Тут наверно нужно что-то запустить (к примеру видео)

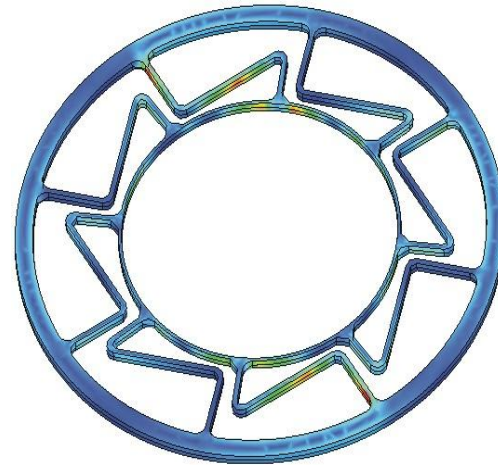
# Подвесы с распределенными параметрами

## Камертонный



**Достоинства:** малая чувствительность к внешним возмущениям  
**Недостатки:** высокие требования к точности сведения резонансных частот

## Кольцевой



**Достоинства:** очень низкая чувствительность к внешним возмущениям (виброускорениям, перегрузкам, ударным ускорениям).  
**Недостатки:** высокие требования к точности изготовления



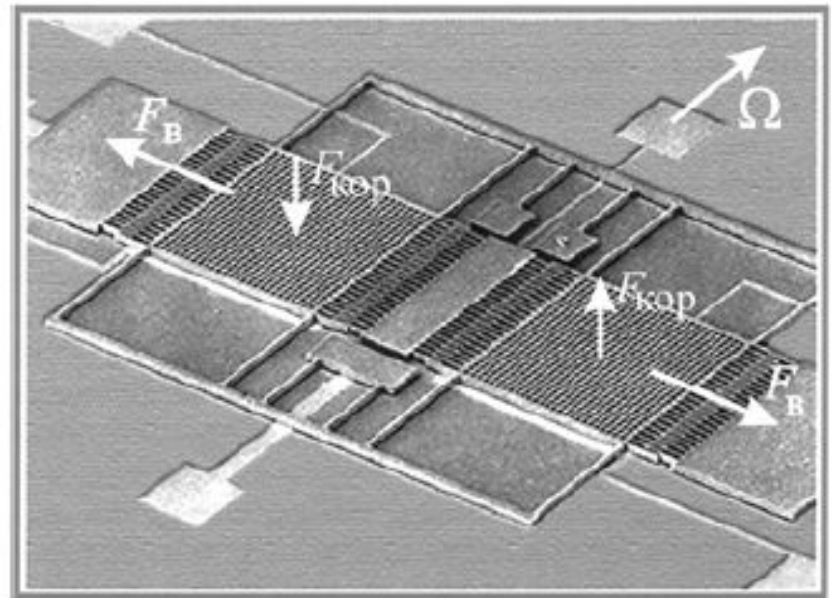
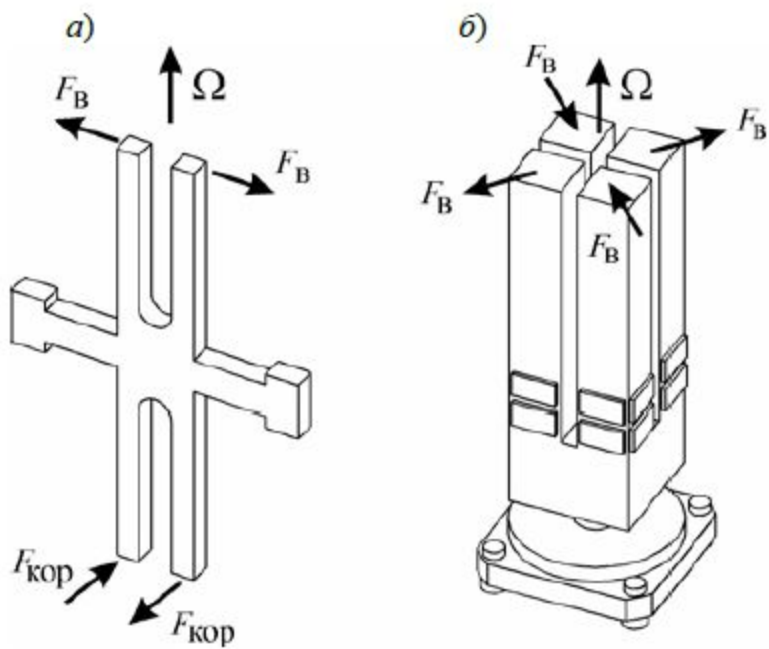
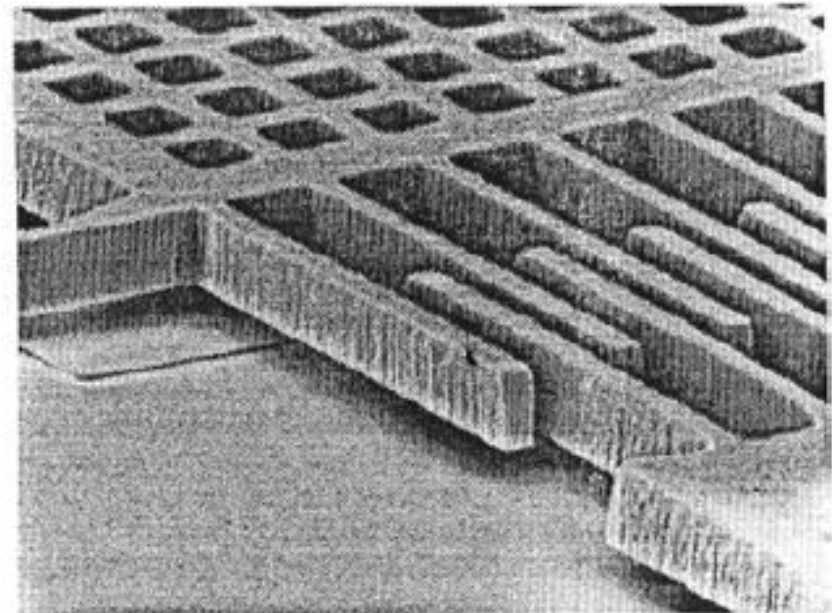


Рис. 11. Конструкции кварцевых камертонных ММГ:  
 а) QRS11 (США), б) Quarason™ (Франция)

Конструкция камертонного планарного гироскопа:  
 а) общий вид гироскопа,  
 б) «гребенчатый» вибропривод





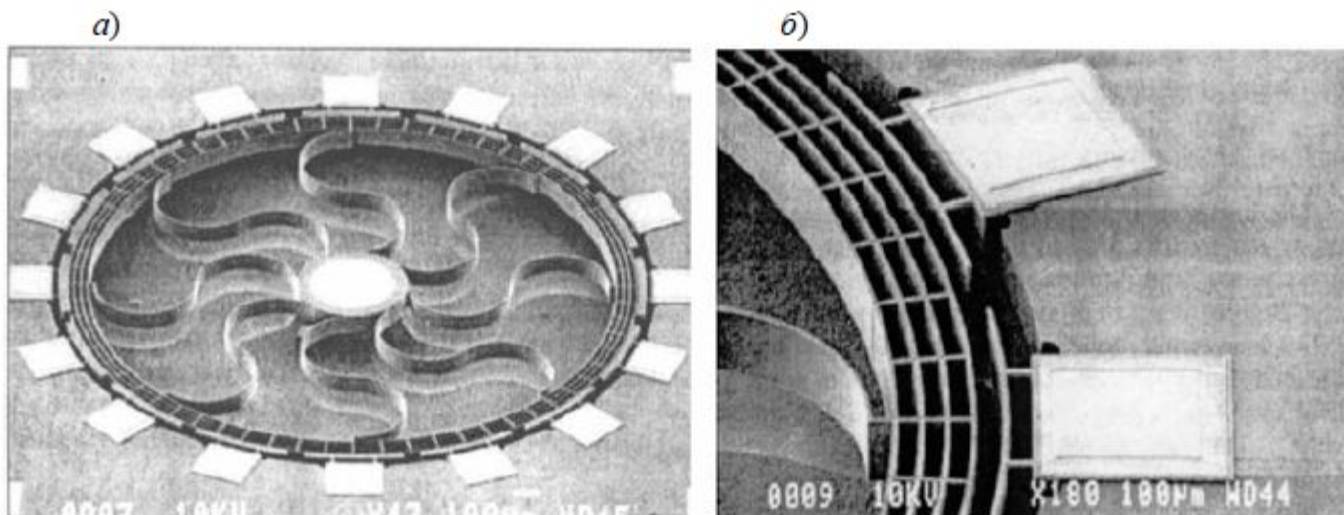


Рис. 13. Волновой ММГ университета *Michigan* (США):  
 а) общий вид гироскопа, б) исполнительные и измерительные датчики

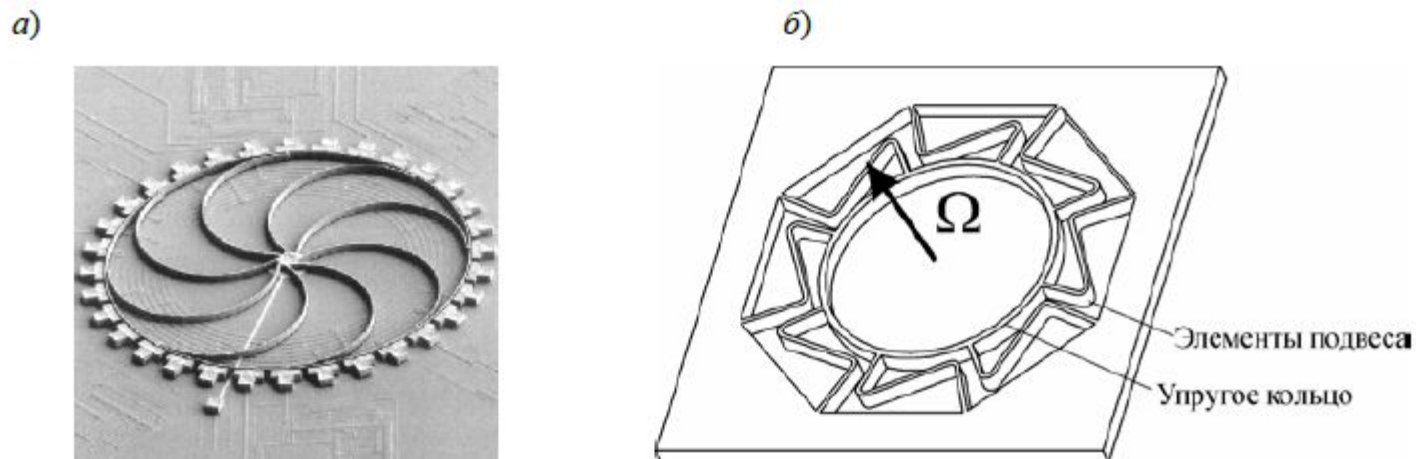


Рис. 14. Конструкции с упругим кольцом:  
 а) *Delco Electronics*, б) *British Aerospace*

# Конструкции с бесконтактными подвесами

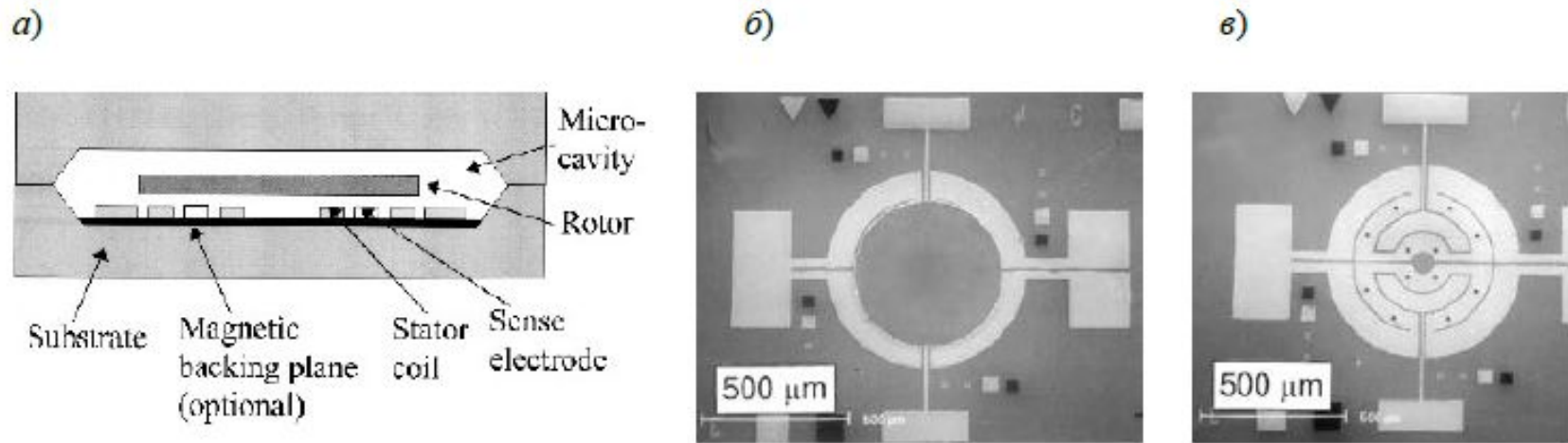


Рис. 15. ММГ с бесконтактным подвесом ротора:  
а) принципиальная схема, б) ротор, в) подвес

Диск диаметром 500 мкм, подвешенный с использованием электромагнитных сил подвеса.

Достигнутая максимальная скорость вращения диска в воздушной среде - 1040 об/мин.

Модификация существующей конструкции позволит достичь частоты вращения 10000 об/мин (около 1 кГц).

Не могут эксплуатироваться на объектах с ударами  $10^2$ – $10^4$  g.

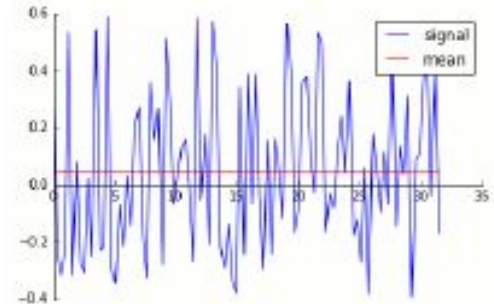
## Сравнение некоторых характеристик типов

Наименование параметра	Карданного типа	Кольцевого типа
Диапазон измеряемых угловых скоростей, °/с	± 50; ± 100; ± 500	± 75; ± 100; ± 150; ± 2000; ± 10000
Систематическая составляющая нулевого сигнала, °/с	4.050	0.055
Случайная составляющая нулевого сигнала, °/ч	0.350	0.01
Нестабильность, от запуска к запуску, 1 СКО, °/с	0.420	0.002
Тренд нулевого сигнала, (°/ч)/ч	32.010	19.160
Нелинейность масштабного коэффициента, %	0.01	0.01

# Систематические погрешности

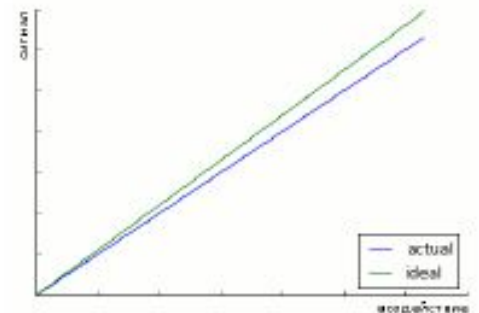
## Смещение нуля (Zero offset)

- ▶ Воздействие отсутствует, но сигнал ненулевой
- ▶ Для акселерометра:  $\sim 80 \text{ mg}$
- ▶ Для гироскопа:  $\sim 1^\circ/\text{с}$



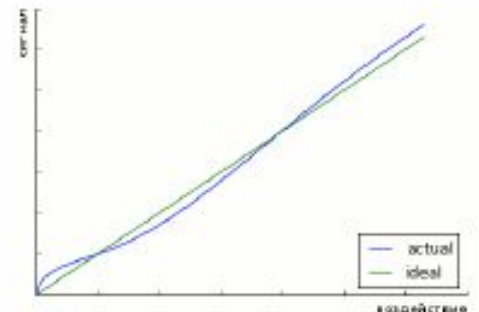
## Погрешность чувствительности (Sensitivity tolerance)

- ▶ Действительные значения градуировочных коэффициентов отличаются от паспортных
- ▶ Для акселерометра/гироскопа: 0.5–5 %



## Нелинейность (Non-linearity)

- ▶ Отклонение соотношения воздействие-сигнал от линейной модели
- ▶ Для акселерометра: 0.1–2 %
- ▶ Для гироскопа: 0.01–0.2 %

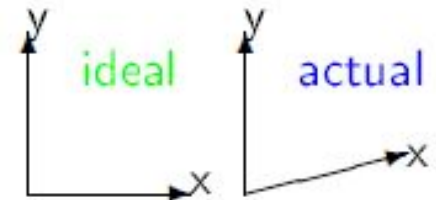




# Систематические погрешности

## Неортогональность осей

- ▶ Также межосевая чувствительность
- ▶ Для акселерометра: 1–2 %
- ▶ Для гироскопа: 1–2 %



## Погрешность выравнивания

- ▶ Оси датчиков не коллинеарны плоскостям корпуса
- ▶ Для акселерометра:  $\sim 0.5$  %
- ▶ Для гироскопа:  $\sim 0.5$  %



## Взаимовлияние воздействий

- ▶ Ускорение влияет на показания гироскопа:  $0.05\text{--}0.1$  °/с на 1 g.
- ▶ Влияние вибраций на показания гироскопа

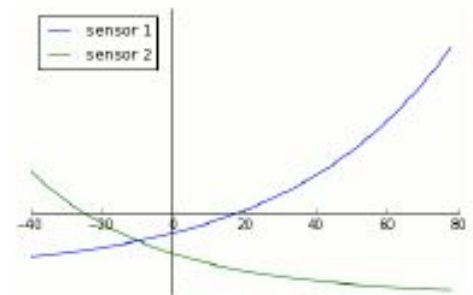
# Систематические погрешности

Систематические погрешности датчиков могут зависеть от окружающей среды:

- ▶ от температуры,
- ▶ от стабильности напряжения питания,
- ▶ от влажности, магнитных полей, радиационного излучения,...

Например, от температуры может зависеть:

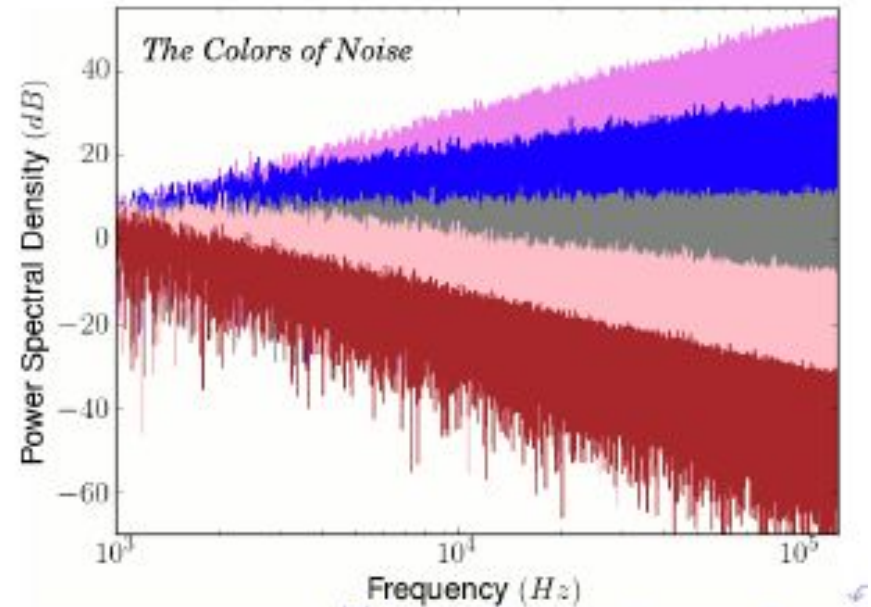
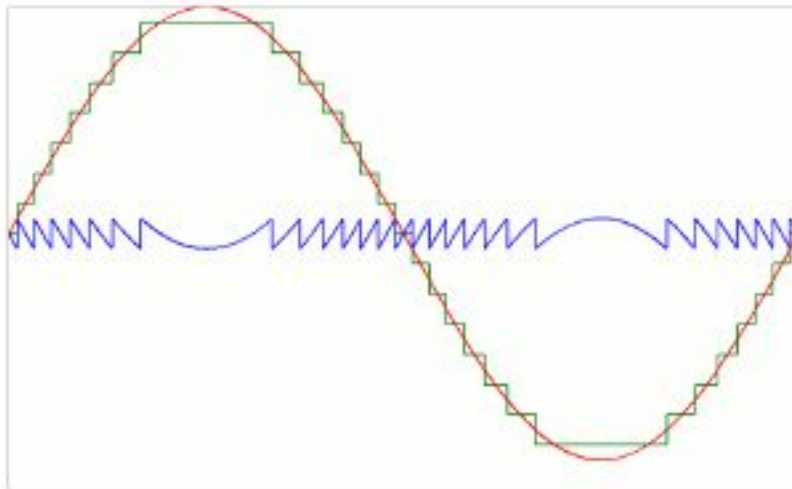
- ▶ смещение нуля
  - ▶ для акселерометра: 0.1–1 mg на 1°C
  - ▶ для гироскопа: 0.01–0.05 °/с на 1°C
- ▶ чувствительность
  - ▶ для акселерометра: 0.005–0.01 % на 1°C
  - ▶ для гироскопа: 0.005–0.01 % на 1°C



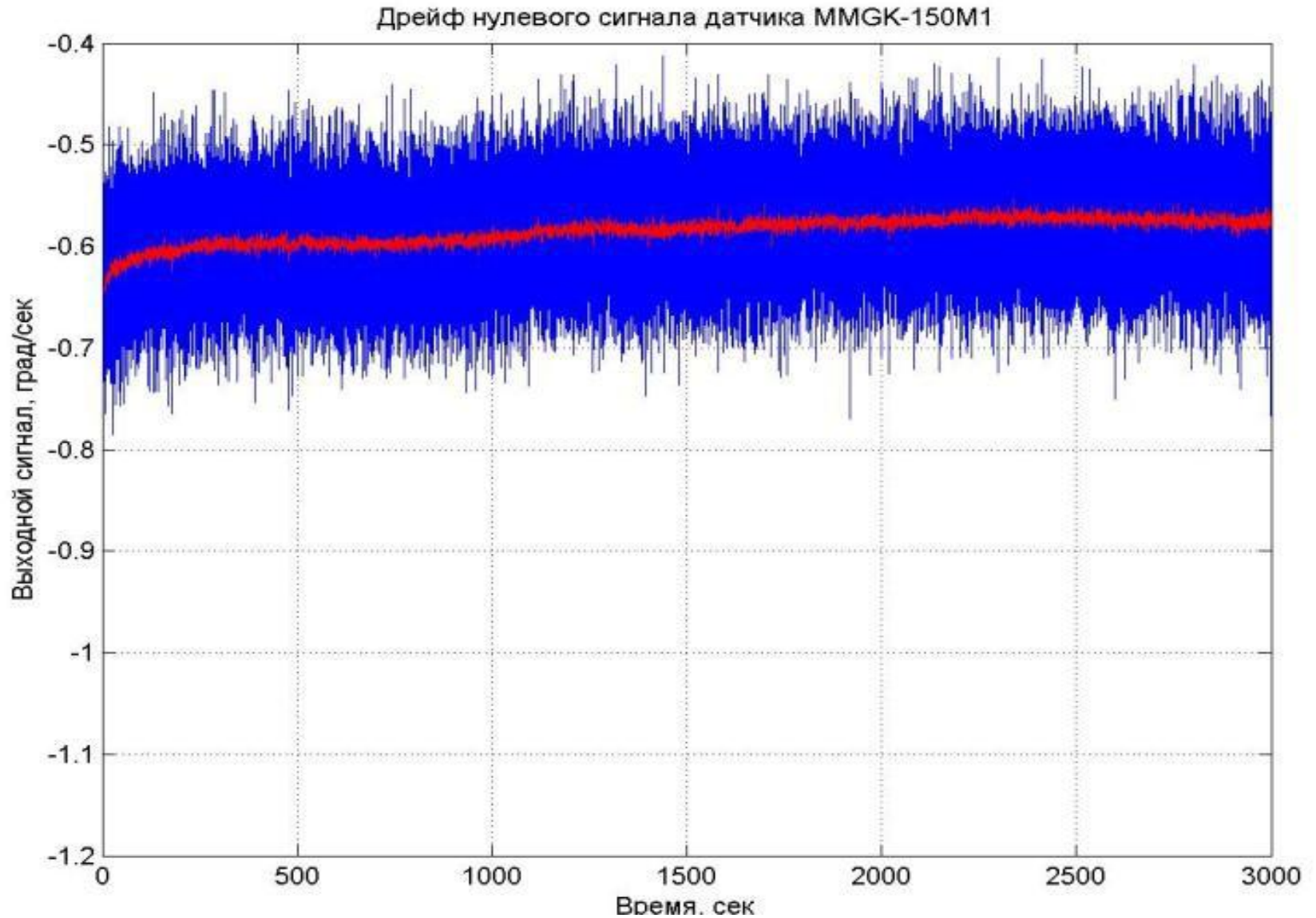
Причём для каждого датчика такая зависимость может быть уникальной (нет общей модели для датчиков данного вида).

# Случайные погрешности

- ▶ Электронные шумы
  - ▶ тепловой шум (равновесный шум, обусловленный тепловым движением носителей заряда в проводнике);
  - ▶ фликкер-шум, или «розовый» шум (неоднородности в проводящей среде, генерация и рекомбинация носителей заряда); ...
- ▶ Шум квантования



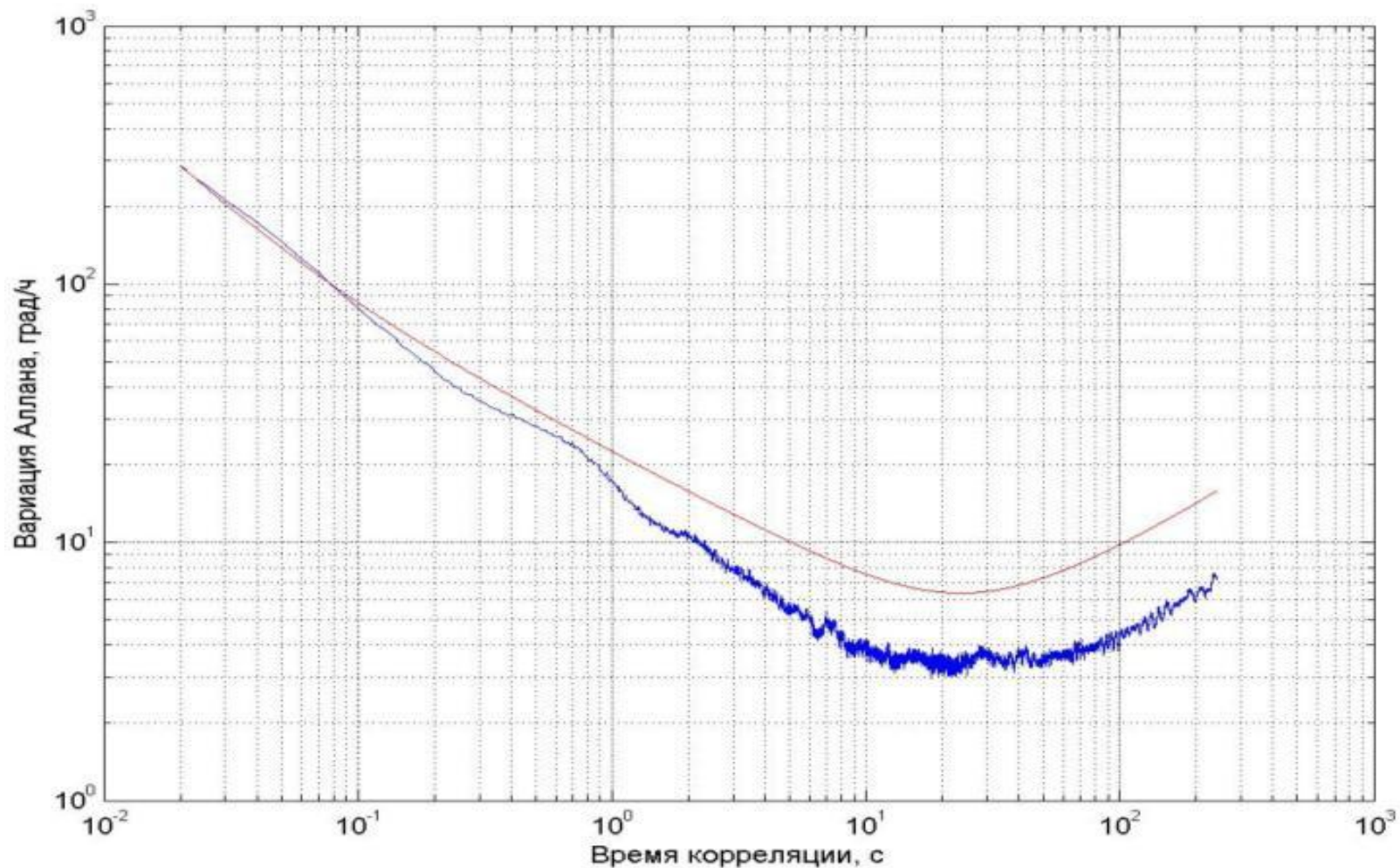
# Характеристики микрогироскопа



Случайная составляющая нулевого сигнала (в полосе 1Гц)



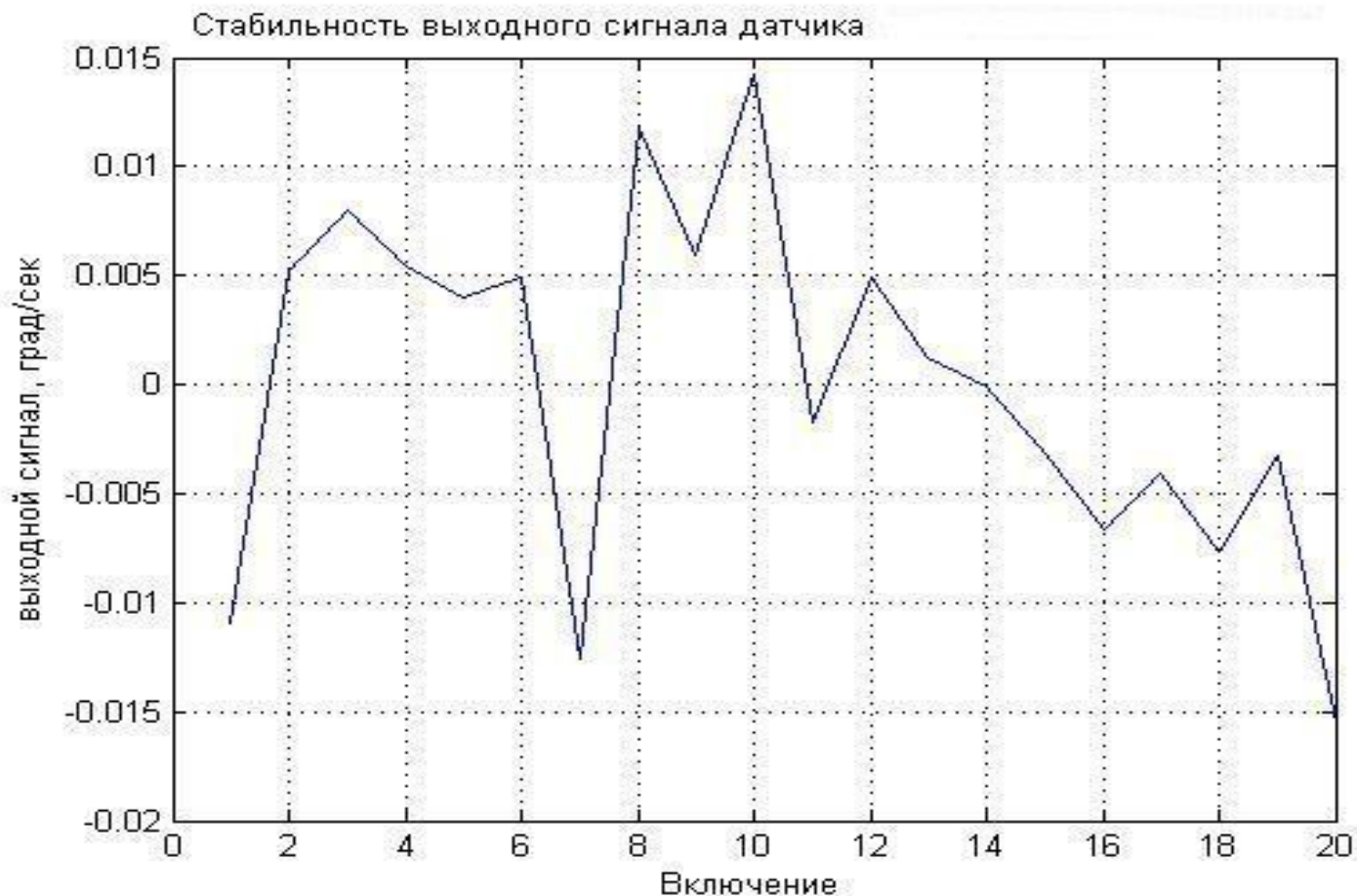
# Характеристики микрогироскопа



Вариация Аллана типового ДУС серии ММГК (микромеханический волновой гироскоп кольцевого типа).  
Нестабильность нуля составляет 3,5 град/ч.



# Характеристики микрогироскопа

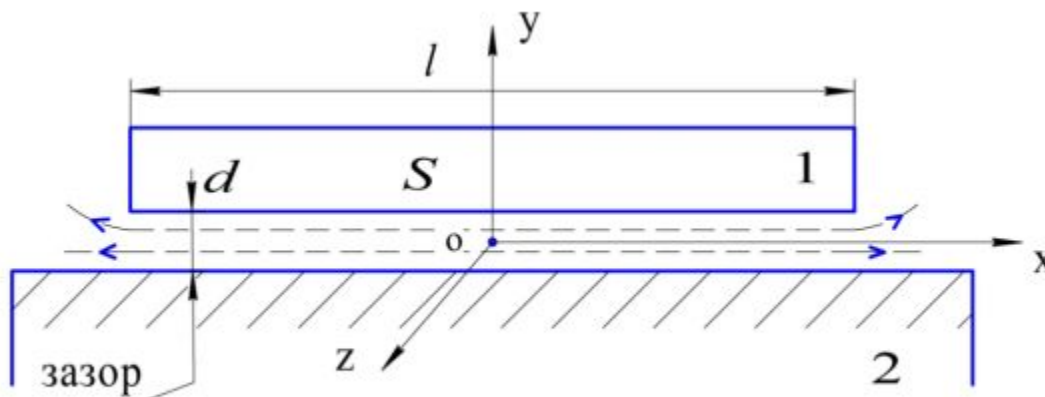


Стабильность нулевого сигнала гироскопа от включения к включению.

СКО за 20 включений: 0.0080 град/с.

Максимальная нестабильность за 20 включений: 0.03 град/с.

# Демпфер



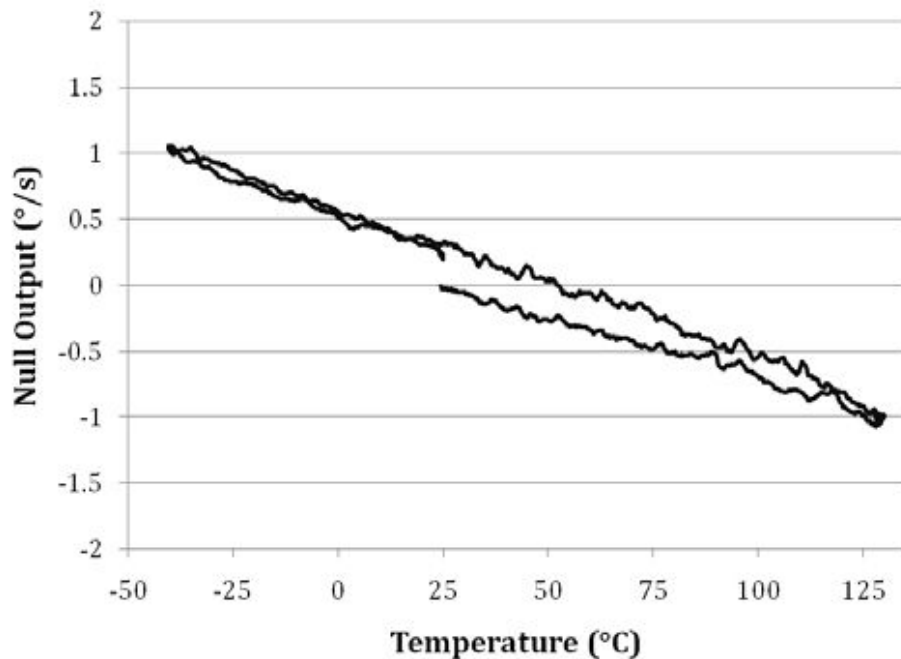
Структурная схема газового течения в тонком зазоре МЭМС

Характеристики:  
динамические  
частотные

Газ	C [K]	T <sub>0</sub> [K]	μ <sub>0</sub> [мкПа с]
Воздух	120	291,15	18,27
Азот	111,2	300,55	17,81
Кислород	126,9	292,25	20,18
Водород	72	293,85	8,76
Гелий	79,4	273,13	19,02
Аргон			21,08

$$k_D = \frac{F_D}{v} \quad \mu = \mu_0 \frac{(C_T + 1) \cdot \tau^n}{C_T + \tau} \quad k_{Dx} = \mu_0 \frac{2\mu S^3}{d^3 [(S/d)^2 + l^2]}$$

# Погрешности



Manufacturer	Part Number	g Sensitivity (°/s/g)
Analog Devices	ADXRS646	0.015
Melexis	MLX90609	0.1
Silicon Sensing	CRG20-01	0.1
VTI	SCR1100-D04	0.1



Manufacturer	g <sup>2</sup> Sensitivity (°/s/g <sup>2</sup> )	Bias Stability (°/h)
Analog Devices	0.0001	8
Melexis	Not Specified	17
Silicon Sensing	0.005	5
VTI	Not Specified	2.1

Manufacturer	Part Number	Running (2 g Peaks)	Helicopter (0.4 g Vibration)	Shipboard (0.5 g Listing)	Construction Equipment (50 g Peaks)
Analog Devices	ADXRS646	4	22	5	36
Melexis	MLX90609	35	150	38	1080
Silicon Sensing	CRG20-01	32	147	37	630
VTI	SCR1100-D04	35	150	38	1080

при введении g-компенсации

Manufacturer	Part Number	Running (2 g Peaks)	Helicopter (0.4 g Vibration)	Shipboard (0.5 g listing)	Construction Equipment (50 g Peaks)
Analog Devices	ADXRS646	1	4	1	14
Melexis	MLX90609	12	35	9	936
Silicon Sensing	CRG20-01	9	32	8	486
VTI	SCR1100-D04	12	35	9	936

# Сравнение гироскопов

	<b>I3G4250D</b>	<b>BMO055</b>
Производитель	STMicroelectronics	Bosch
Ед. измерения: °/с или рад/с		
Размеры, мм	4 × 4 × 1.1	3.8 × 5.2 × 1.13
Диапазон, °/с	±2000	±2000
Разрешение 1 LSB, °/с	0.07	0.06
Разрядность, бит	16	16
Частота измерений, Гц	≤840	≤100
Напряжение питания, В	2.4–3.6	2.4–3.6
Ток потребления, мкА	5–6100	330–12300
Рабочий диапазон, °С	–40 ... +85	–40 ... +85

# MEMS - расшифровка названий

*Sensor Type*  
**LIS or L:** Linear Inertial Sensor  
**AIS:** Automotive Inertial Sensor  
**LPS:** Linear Pressure Sensor  
**LSM:** Linear Sensor Module

*Number of Axis*  
**2:** 2-Axis Accelerometer  
**3:** 3-Axis Accelerometer  
**Y:** Yaw Gyro  
**PR:** Pitch /Roll Gyro  
**PY:** Pitch/Yaw Gyro  
**YPR:** Yaw/Pitch/Roll Gyro

*Number of Gyro Axis*  
**0:** No gyroscope

*Number of Magneto Axis*  
**3:** 3-Axis Magnetometer

*Output*  
**A:** Analog  
**D:** Digital

*Package*  
**L:** LGA  
**Q:** QFN  
**S:** SO

*Package size*  
**\_:** Normal  
**C:** Compact

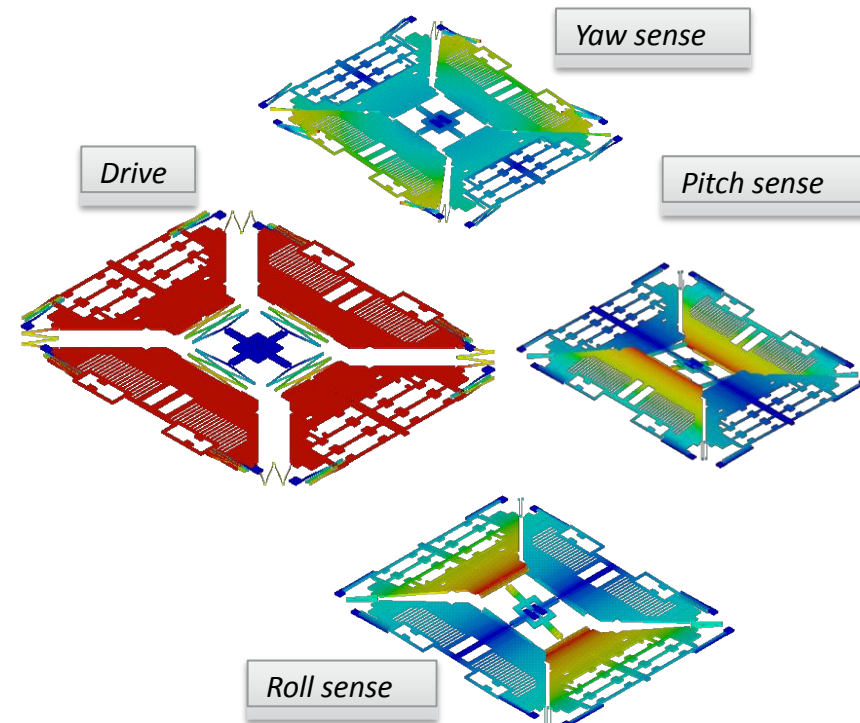
**LSM 3 0 3 D L H C**

*Performance Level*  
**H:** High  
**M or \_:** Medium  
**F:** Low



# Гироскоп L3GD20

- 3-осевой цифровой гироскоп, цифровой SPI/I2C интерфейс
- Высокое разрешение, 16 бит разрешение
- Измерение вращения по 3 шкалам:  $\pm 250^\circ/\text{с}$ ,  $\pm 500^\circ/\text{с}$  и  $\pm 2000^\circ/\text{с}$
- Power Down (5 мкА) и Sleep (2 мА) режимы
- Interruption и Data Ready выходные линии
- Высокая производительность:
  - Иммунитет к аудио и механическому шуму
  - Высокое разрешение/высокая температурная стабильность
  - Высокая шокостойчивость: 10 000g в течении 0.1 мс
- Дополнительные параметры:
  - 4 Output Data Rates(ODR): 95, 190, 380, 760 Гц
  - 8-бит выход температурного датчика, FIFO - буфер
  - Конфигурируемые фильтры низких и высоких частот
  - Функция самотестирования



# Гироскоп L3G3250A

- **3-Осевой Аналоговый Гироскоп**
- **Иммунитет к аналоговому шуму и вибрациям**
- **2 шкалы измерения:  $\pm 625^\circ/\text{с}$  и  $\pm 2500^\circ/\text{с}$**
- Power down и Sleep режимы
- Функция **самотестирования**
- Заводская калибровка
- **Высокая чувствительность:  $2 \text{ мВ}/^\circ/\text{с}$  при  $625^\circ/\text{с}$**
- Встроенный фильтр нижних частот
- Высокая температурная стабильность ( $0.08^\circ/\text{с}/^\circ\text{C}$ )
- Высокое шоковое состояние:  $10000\text{g}$  в течении  $0.1 \text{ мс}$
- Температурный диапазон от  $-40$  до  $85^\circ\text{C}$
- Напряжение питания:  $2.4 - 3.6\text{В}$
- Потребление:  $6.3 \text{ мА}$  в Normal,  $2 \text{ мА}$  в Sleep и  $5 \text{ мкА}$  в Power Down режимах
- **Корпус  $3.5 \times 3 \times 1 \text{ LGA}$**

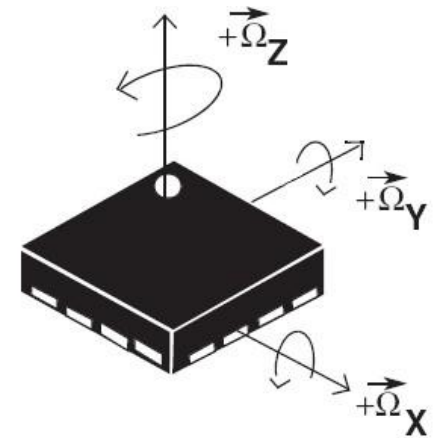


# A3G4250D: 3-осевой гироскоп для автомобильного рынка

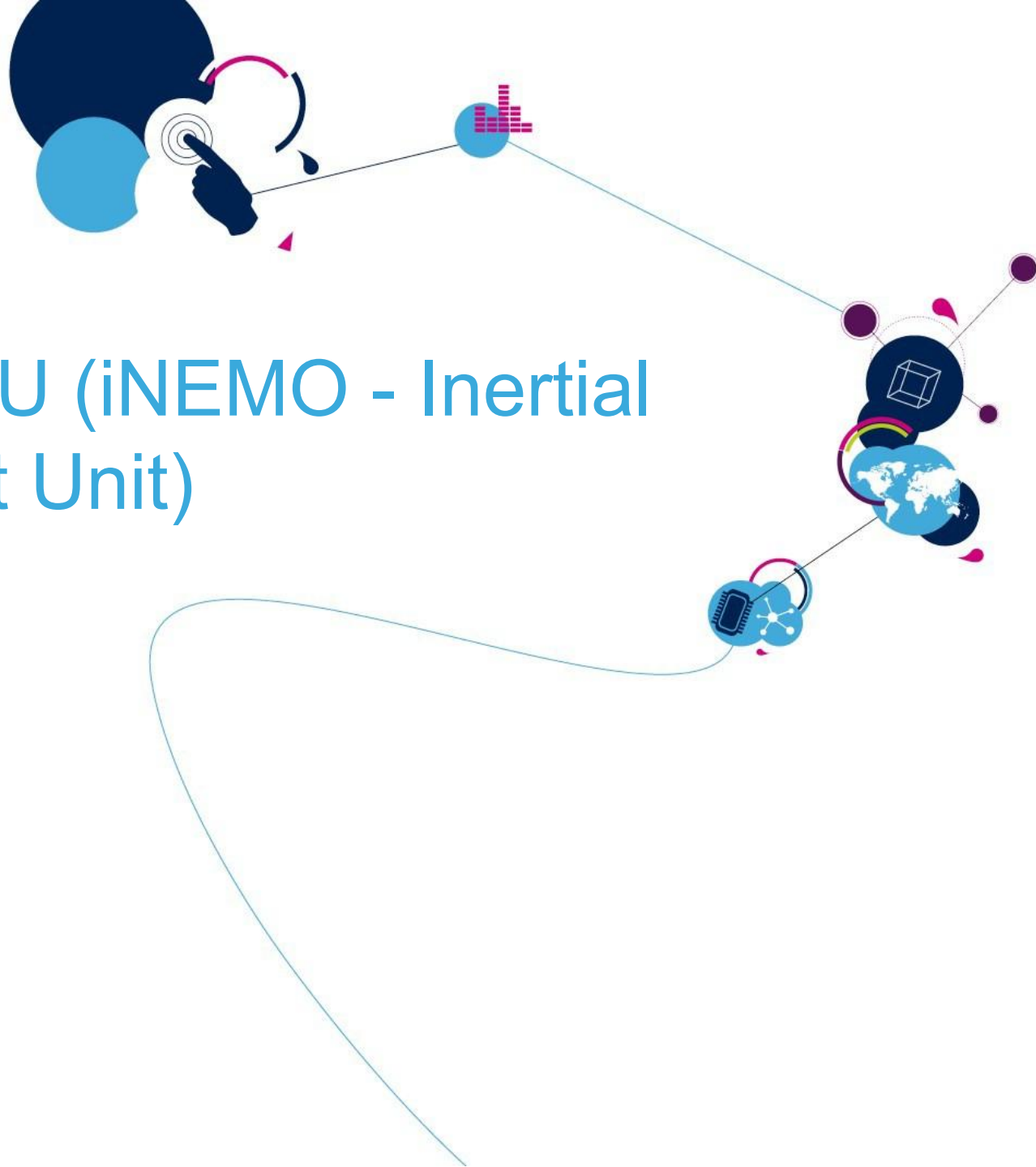
## A3G4250D

Automotive – 3 axes – Gyroscope – 4x4 LGA 16L –  $\pm 245$ dps full scale – Digital Output

- Совместим по выводам с L3G4200D
- Низкое потребление
- Низкий шум и высокая стабильность по температуре
- Области применения: трекинг-системы, автотрекеры, навигация, определение угла наклона
- AEC-Q100



# MЭМС IMU (iNEMO - Inertial Movement Unit)



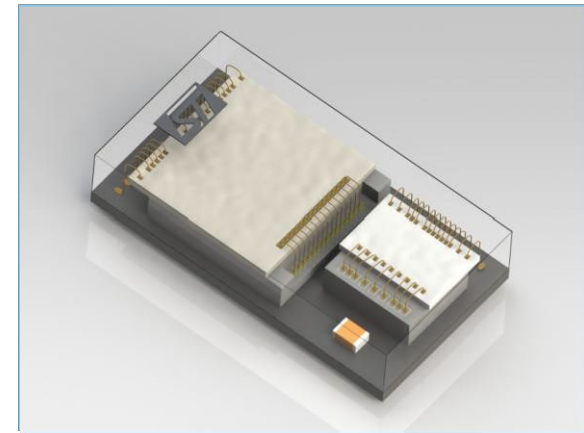
# МЭМС модуль – iNEMO Inertial Module

## LSM330D:

- МЭМС Акселерометр + Гироскоп
  - 3-осевой акселерометр,  $\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16g$
  - 3-осевой гироскоп,  $\pm 250 \pm 500 \pm 2000 \text{ dps}$
  - SPI/I<sup>2</sup>C интерфейс
  - Режим Power-Down
  - 4 линии прерывания (2 для гироскопа и 2 для акселерометра)
  - 2 x FIFOs и датчик температуры
  - Корпус 3x5.5x1 мм

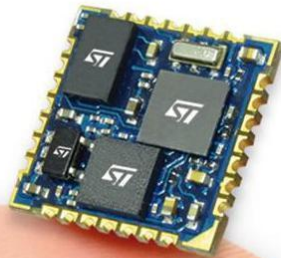


**LSM330D\***  
MEMS IMU





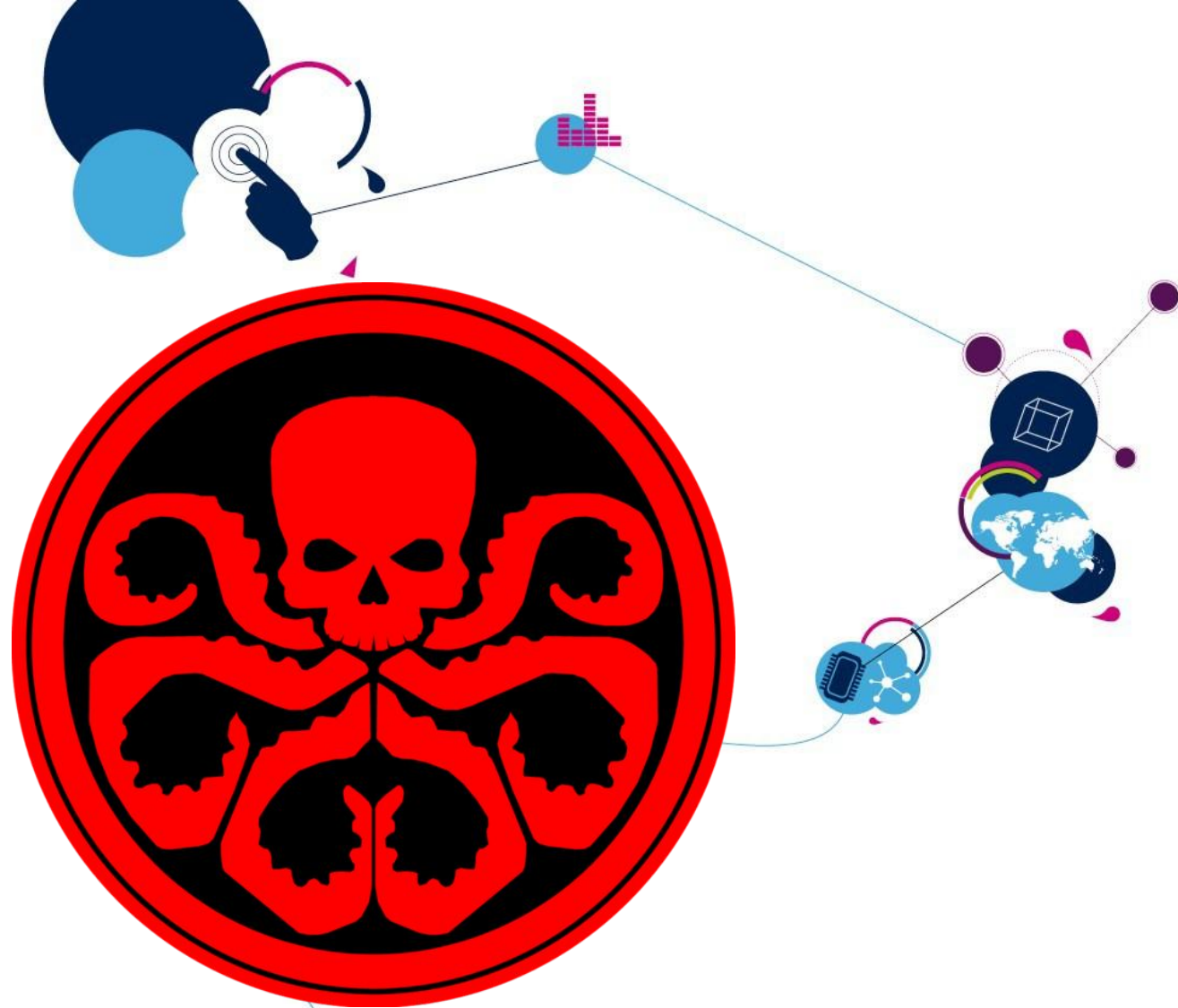
# 9-осевой модуль iNEMO



## **iNEMO-M1**

- Маленький размер: 13 x 13 x 2 мм
- L3GD20: 3-осевой цифровой гироскоп
- LSM303DLHC: 6-осевой геомагнетический модуль
- STM32F103REY: WLCSP, ARM®-based 32-bit MCU
- LDS3985M33R: ultra low drop-low noise voltage regulator.
- Доп интерфейсы: CAN, USART, SPI и I<sup>2</sup>C; full-speed USB 2.0
- Свободные АЦП каналы для внешних сигналов
- **iNEMO SW Fusion библиотека**
- **Доступность в Q4 iNEMO-M1 и Q1 2013 для iNEMO-PRO (sensor fusion SW embedded)**

1. [habrahabr.ru](http://habrahabr.ru) Сравнение характеристик микромеханических гироскопов
2. **Бабур Н ., Ш мидт Д ж.** Направления развития инерциальных датчиков//Гироскопия и навигация. – 2000. - № 1. - С.3-15.
3. **Shearwood C., Ho K.Y., Williams C.B., Gong H.** Development of a levitated micromotor for application as a gyroscope//Sensor and Actuators 83, 2000, pp.85-92.
4. **Распопов В.Я.** Микромеханические приборы: Учебн. пособие. – Тула: Тул.ГУ, 2002. – 392 с.
5. **Murakoshi T., Fukatsu K., Nakamura S., Esashi M.** Electrosatically Levitated Rotational Ring-Shaped Gyro/Accelerometer for Inertial Measurement System//Symposium Gyro Technology, 2002. – pp.7.0-7.9.
6. **Неаполитанский А.С., Хромов Б.В.** Микромеханические вибрационные гироскопы. – М.: «Когито-центр», 2002. – 122 с.
7. **Евстифеев М.И.** Состояние разработок и перспективы развития микромеханических гироскопов//Сб. докладов II конф. молодых ученых «Навигация и управление движением». С-Петербург, 2000. - С.54-71.
8. **Свидетельство на полезную модель № 18768.** РФ. Микромеханический вибрационный гироскоп /М.И.Евстифеев, С.Г.Кучерков, Л.П.Несенюк, В.Г. Пашухонцев, А.А. Устинов. – 2004.



Спасибо за внимание