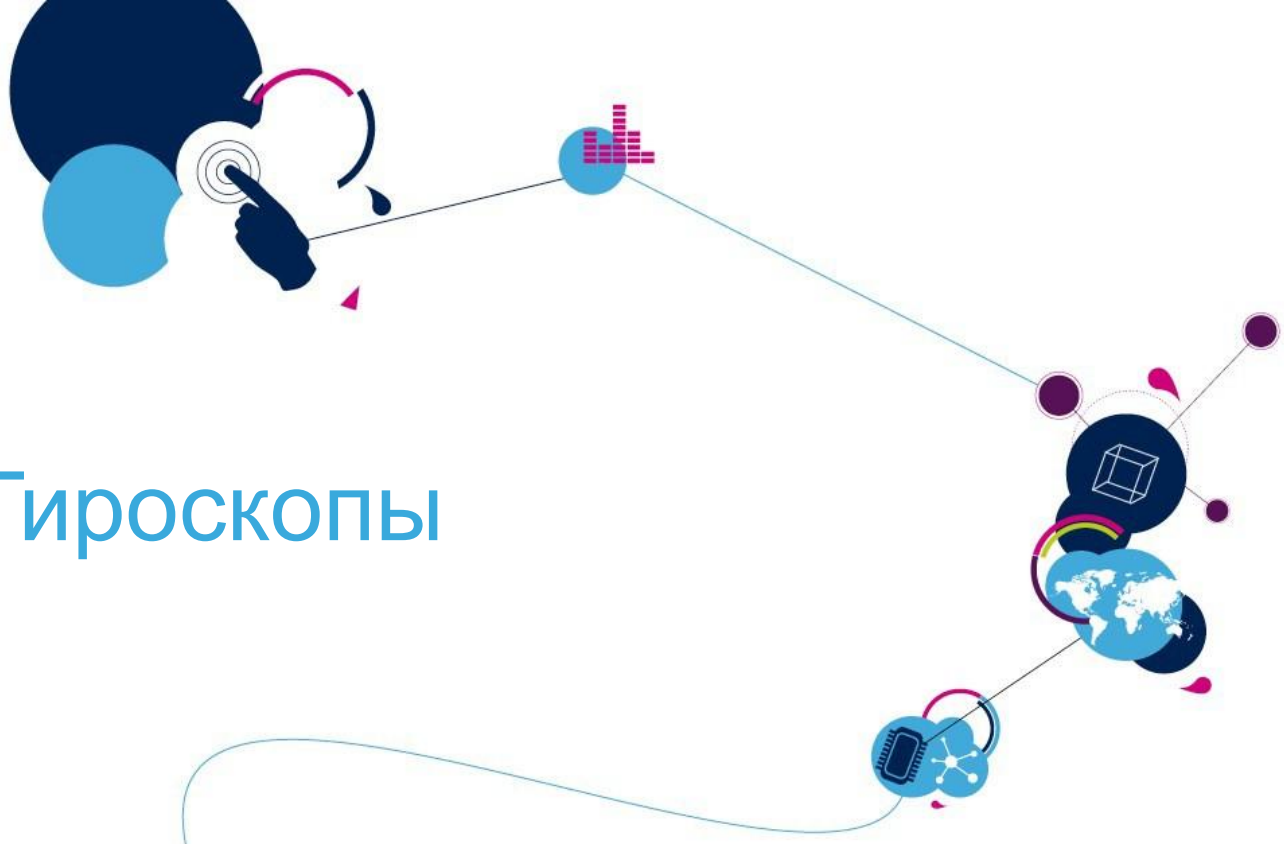


МЭМС - Гироскопы

Ригоев Иван

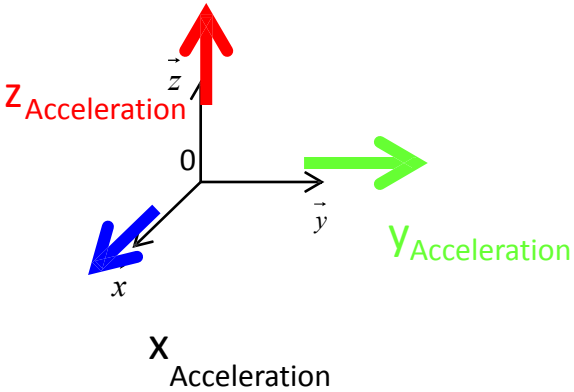
Петрозаводск

2017

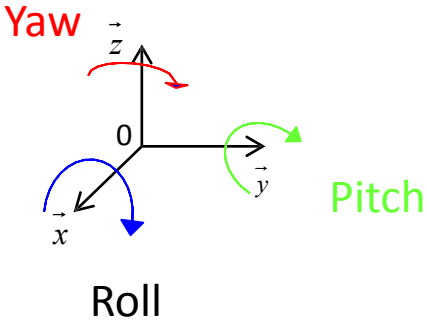
Акселерометр и Гироскоп

Акселерометр измеряет **<u>линейное ускорение</u>**
Гироскоп измеряет **<u>угловое перемещение</u>**

Акселерометр и
Ньютон F = m
A



Гироскоп и
Корис ис V x
F = - m V x Ω



МЭМС акселерометр и гироскоп объединены в отдельный модуль -

IMU (Inertial Measurement Unit)

Применение

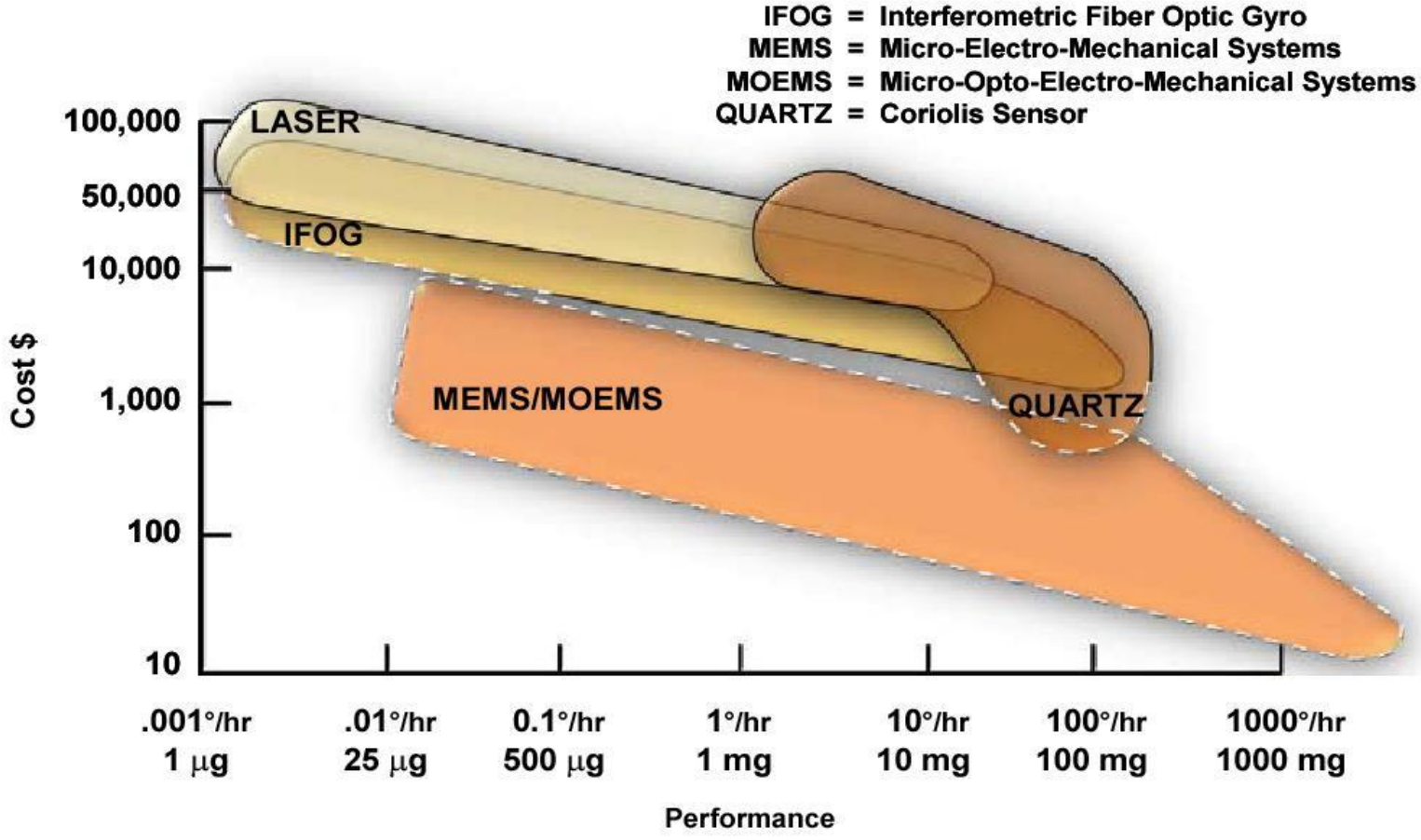
– Игровые консоли и смартфоны.
– Стабилизация изображения в фото и видеокамерах.
– Расширение GPS-решений (системы счисления пройденного пути).
– Системы управления движением в робототехнике.
– Стабилизация и контроль платформ промышленного оборудования.
– ВПК (ракеты, БПЛА, машины)
– Подслушивание разговоров

Сравнение параметров инерциальных систем

КЛГ- кольцевые лазерные гироскопы

ВОГ – волоконно оптические гироскопы

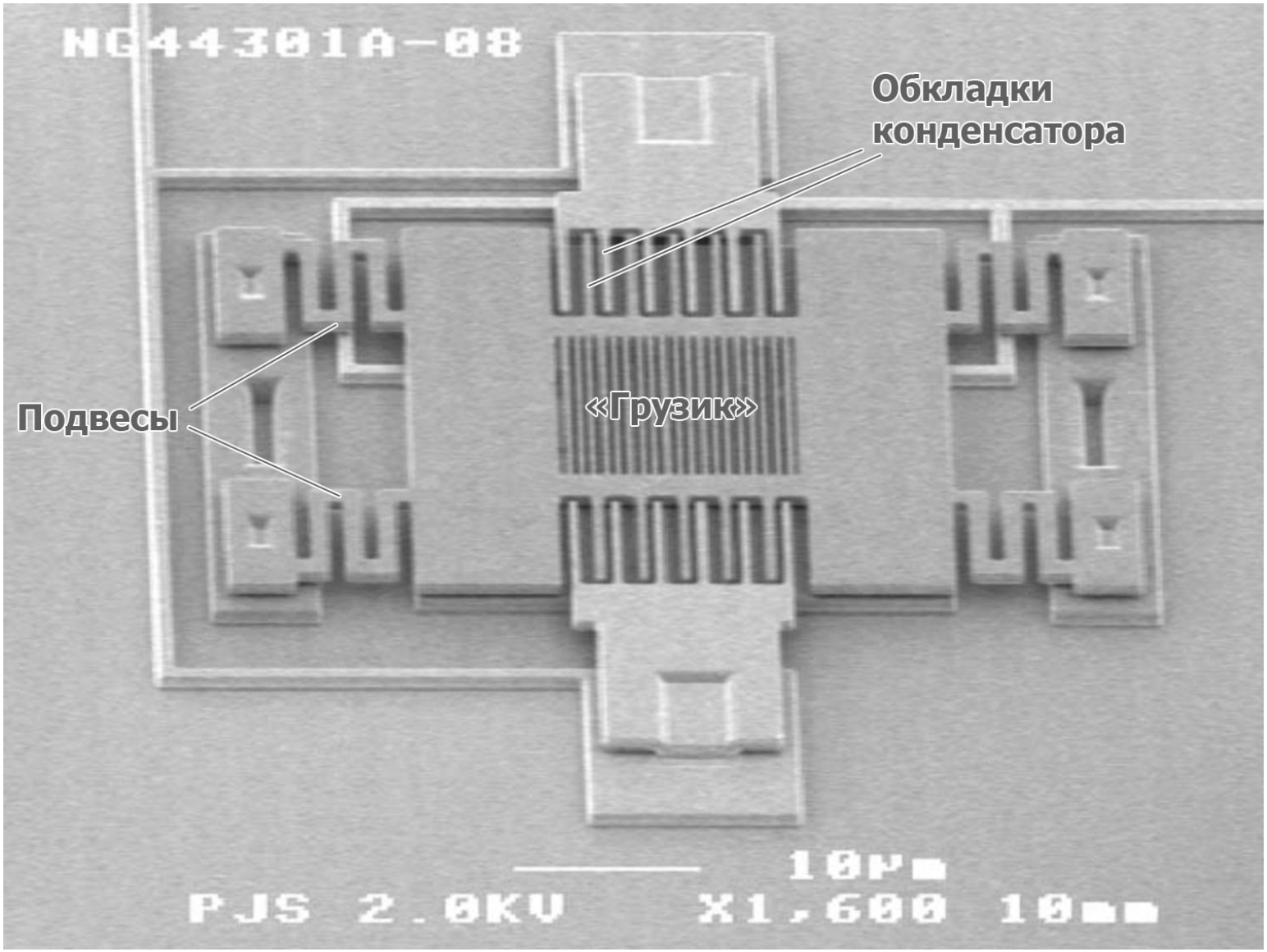
МЭМС/ МОЭМС (НЭМС) – микро (опто) механические системы



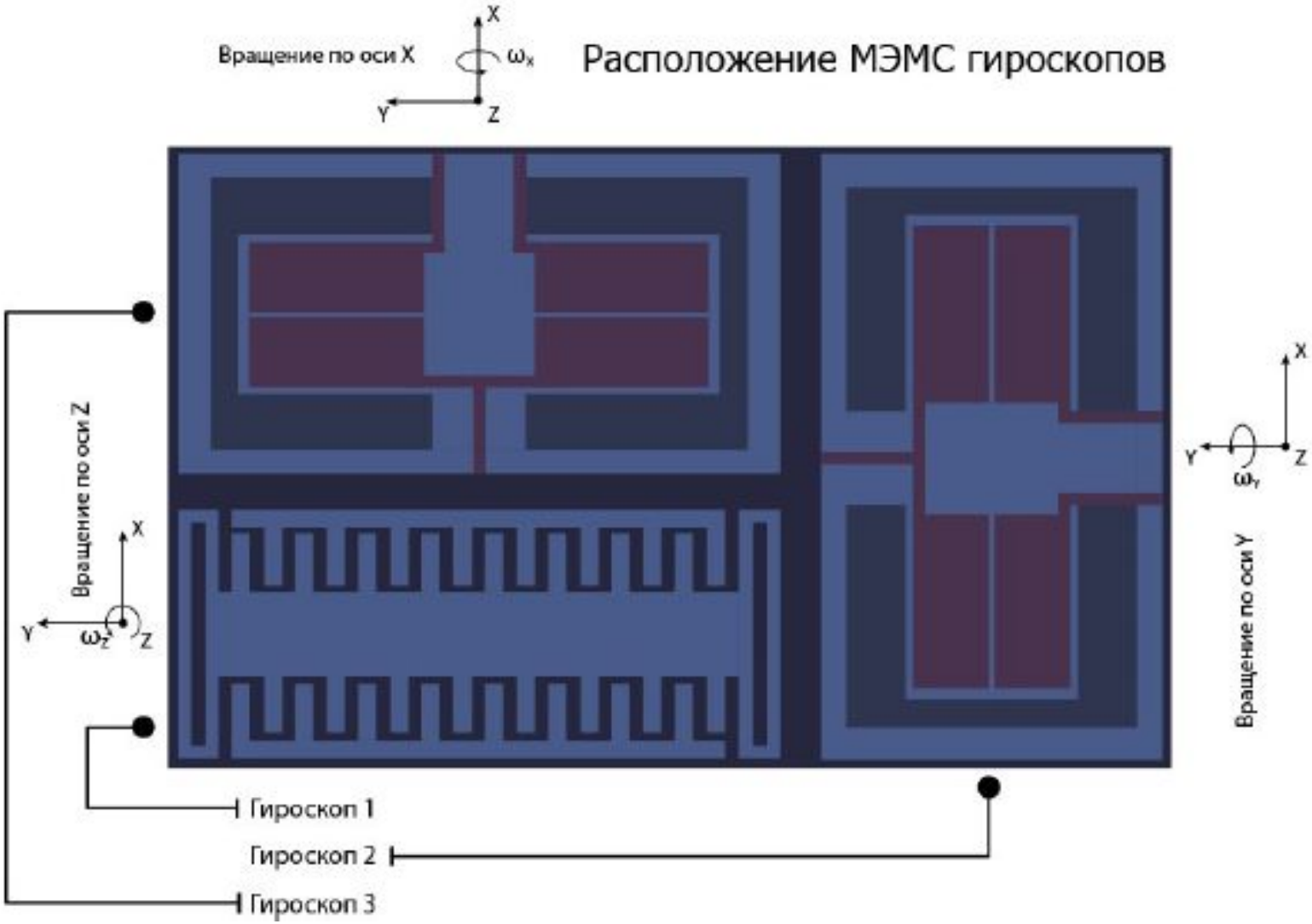
Характеристики: 1-дрейф угловой скорости, °/час (гироскопы);

2- погрешность, mg (акселерометры)

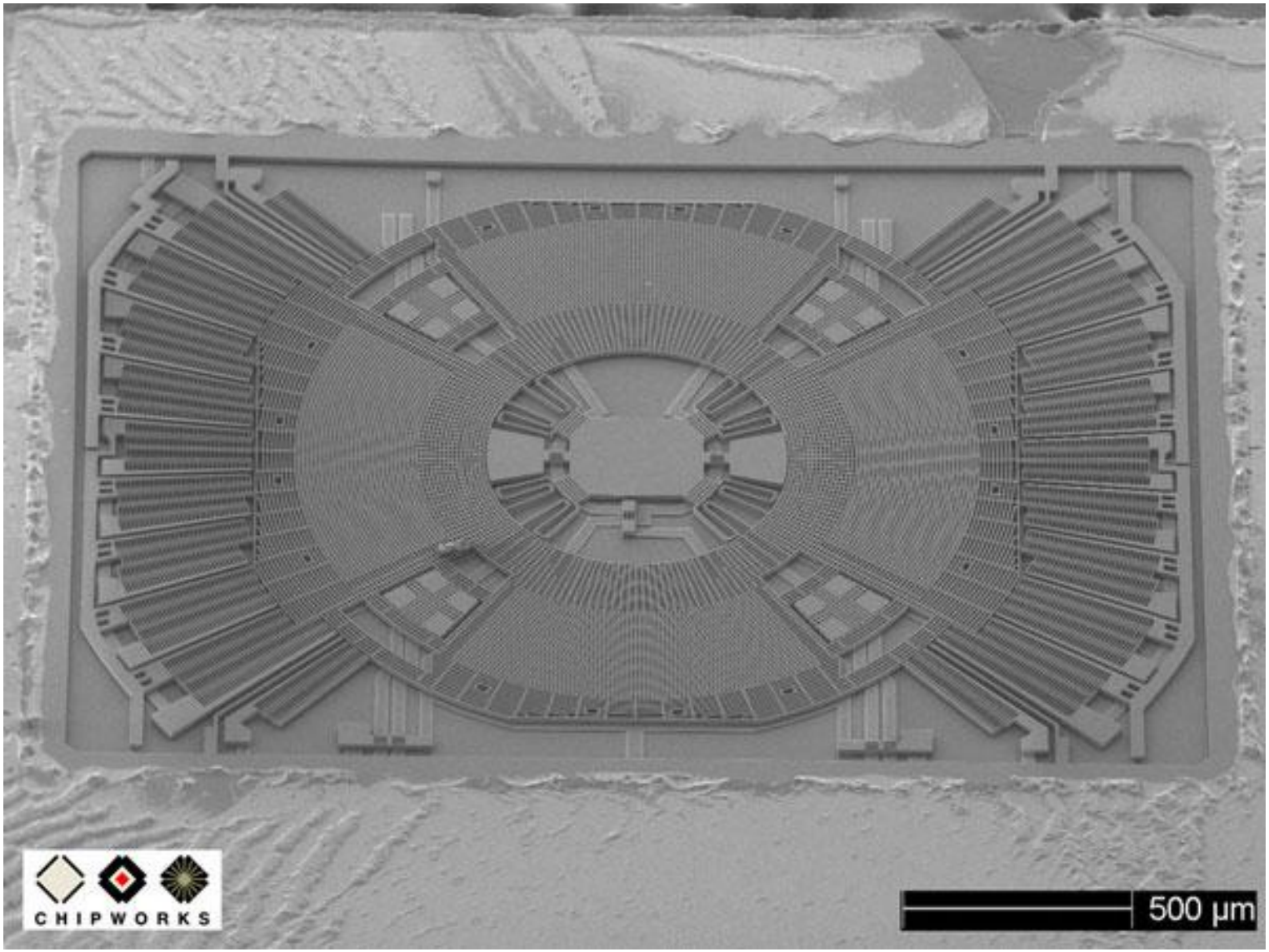
Варианты реализации



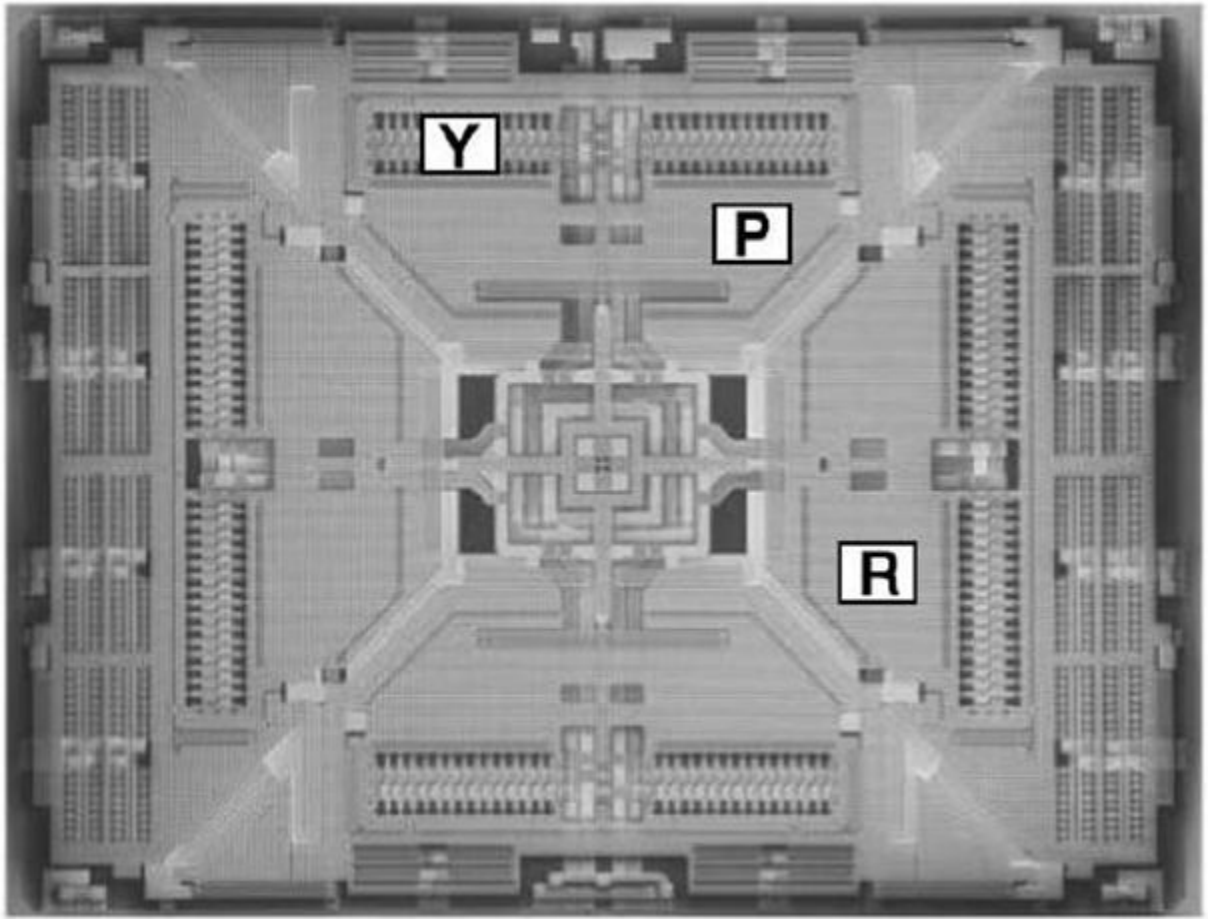
А как сделать трехосевой?



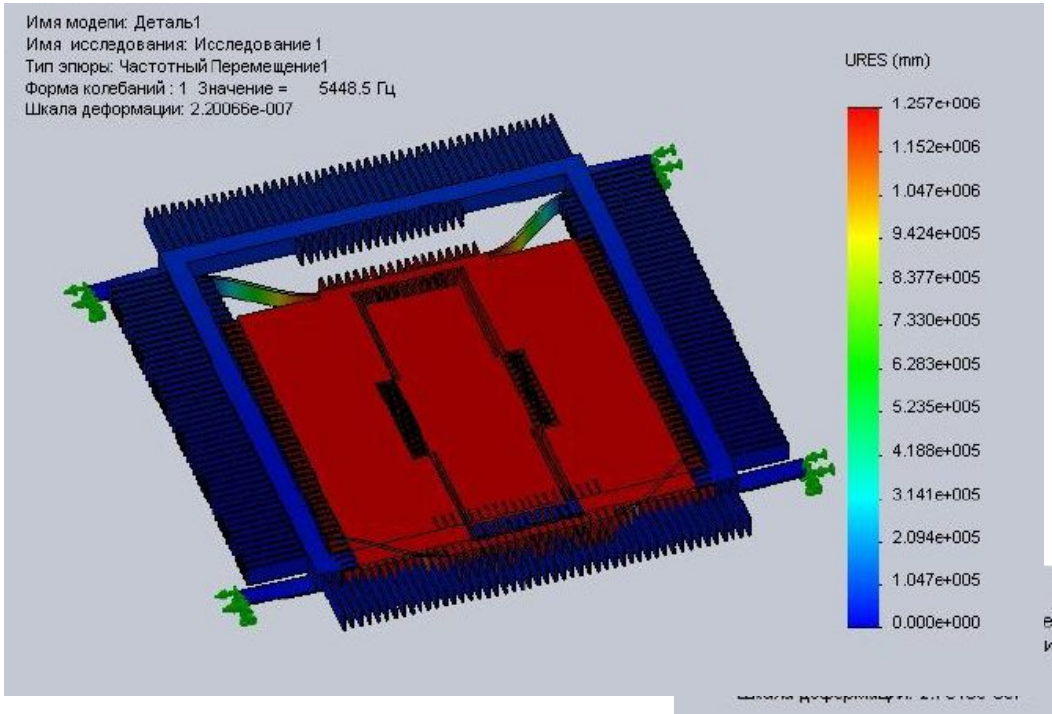
Варианты реализации



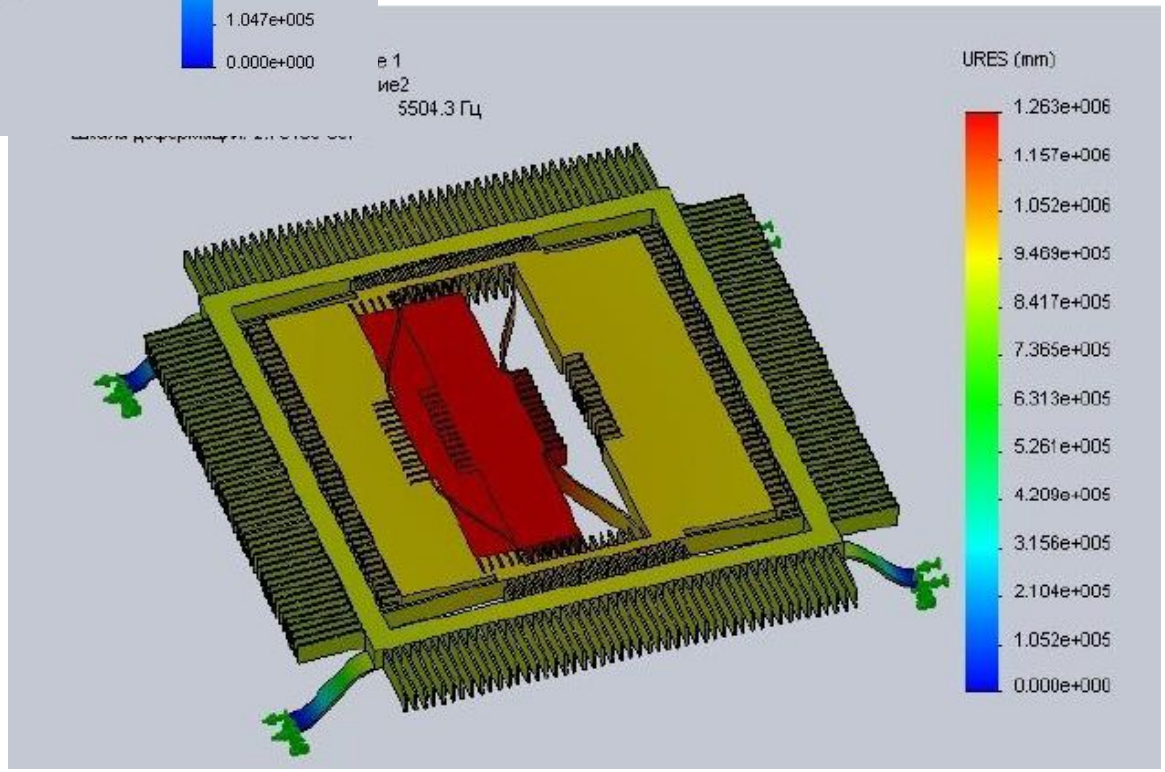
Внутренняя структура гироскопа



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

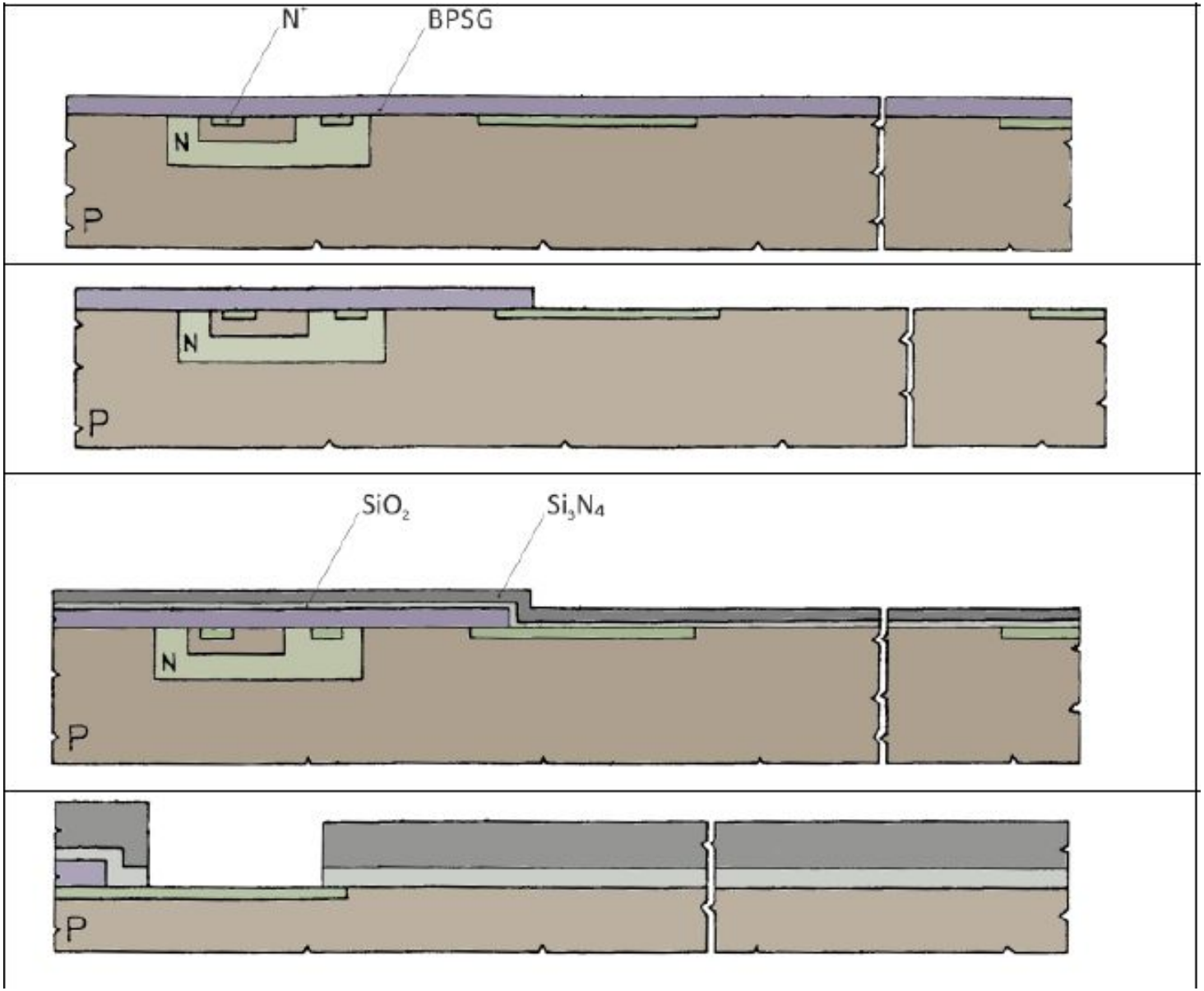


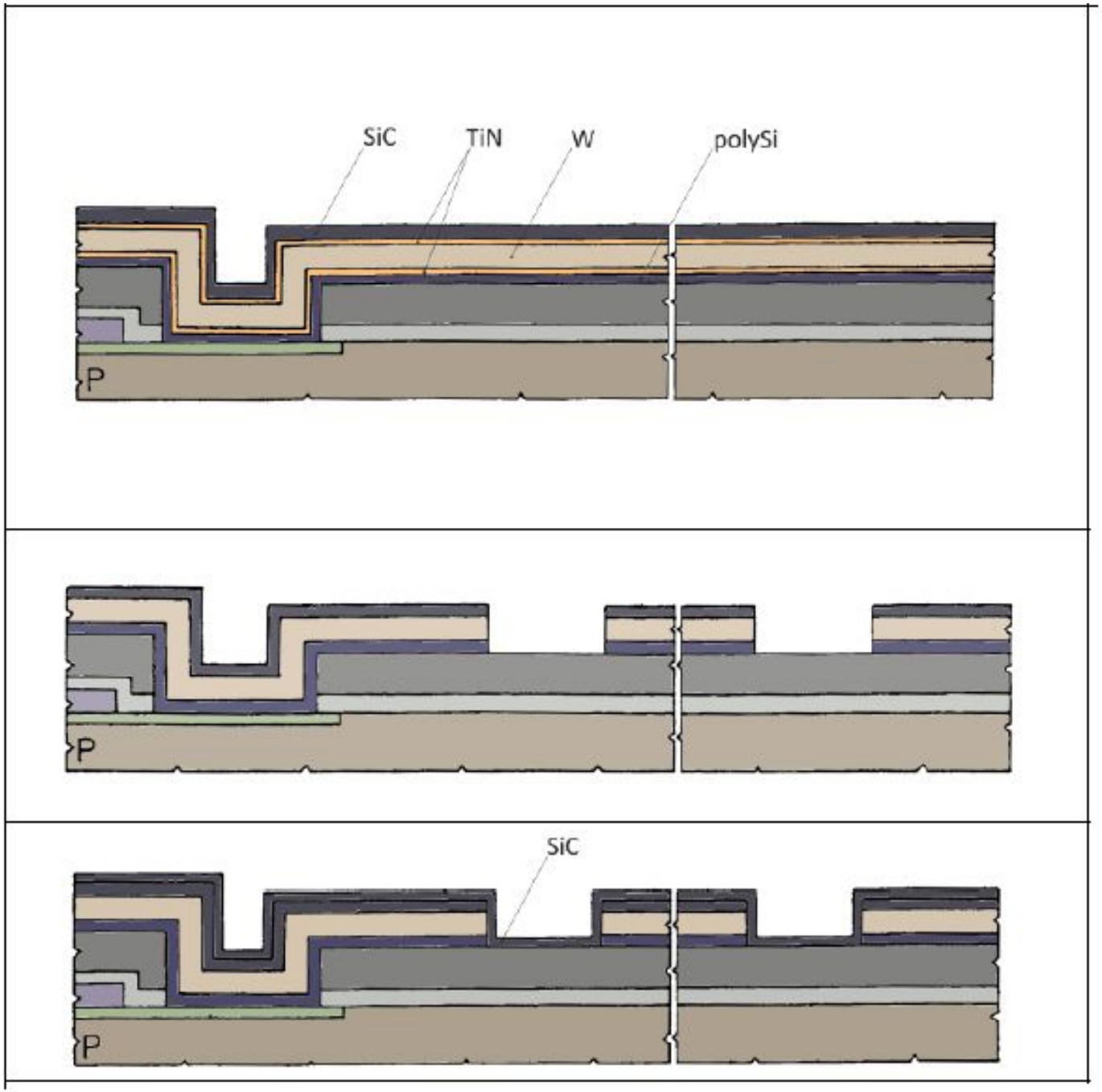
Информативные колебания гироскопа вдоль оси Y

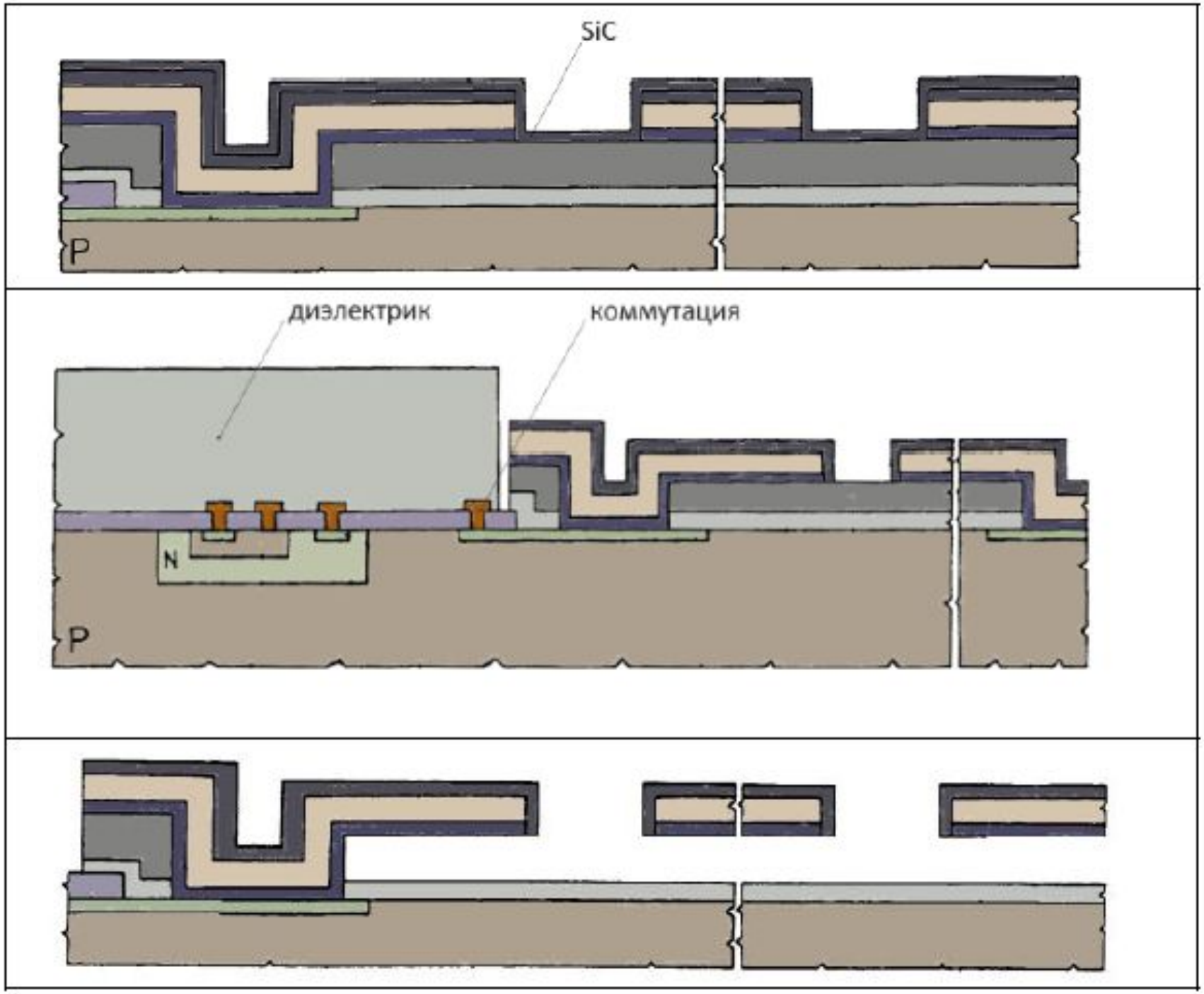


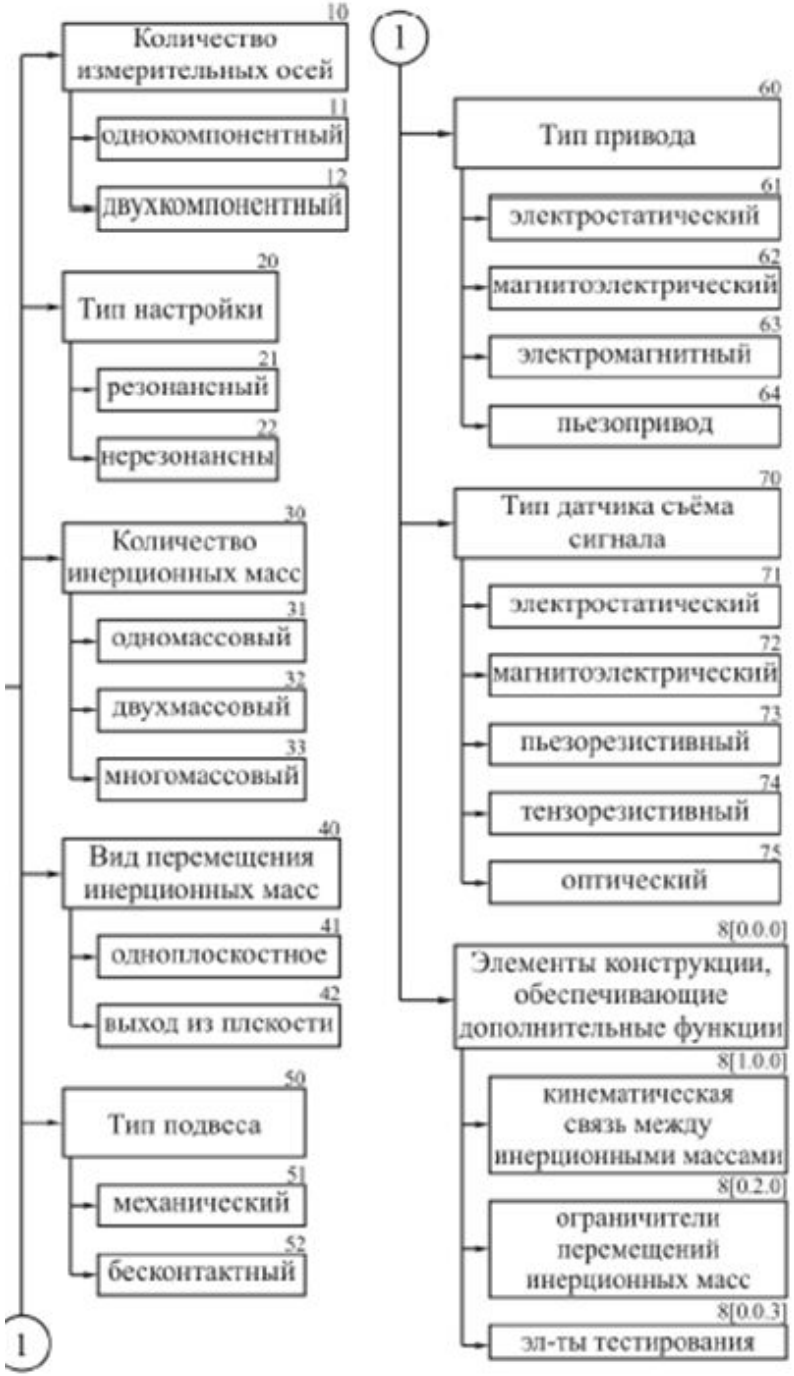
Информативные колебания гироскопа вдоль оси X и первичные колебания вдоль оси Z

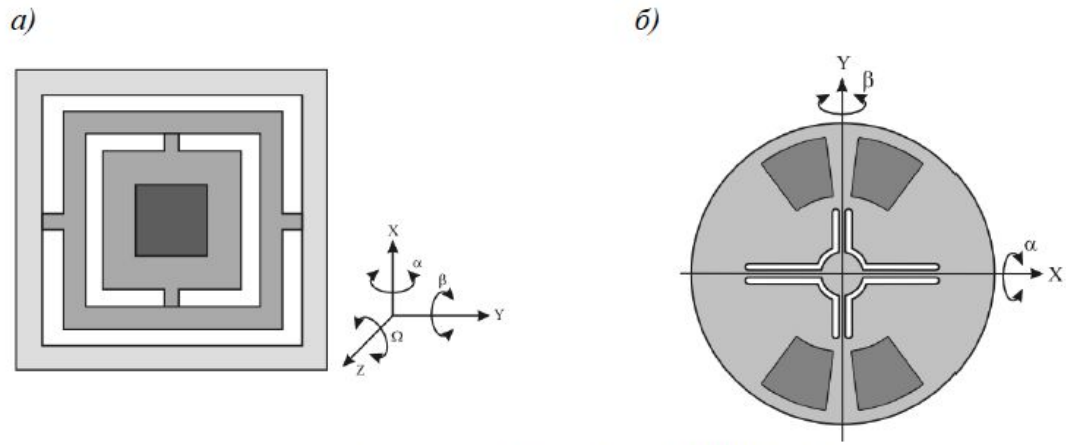
Как сделать гироскоп?



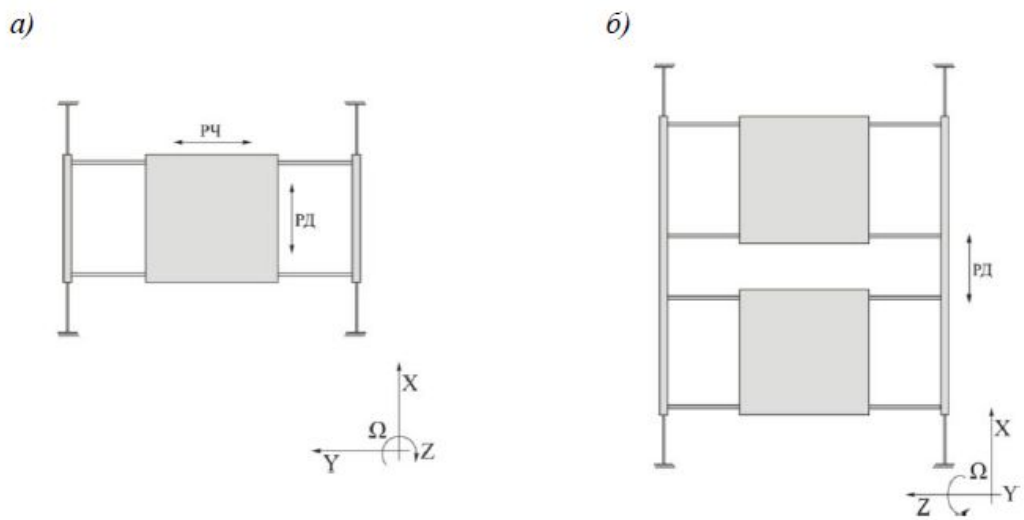

SiC
TiN
W
polySi
P
P
SiC
P


SiC
P
диэлектрик
коммутация
N
P





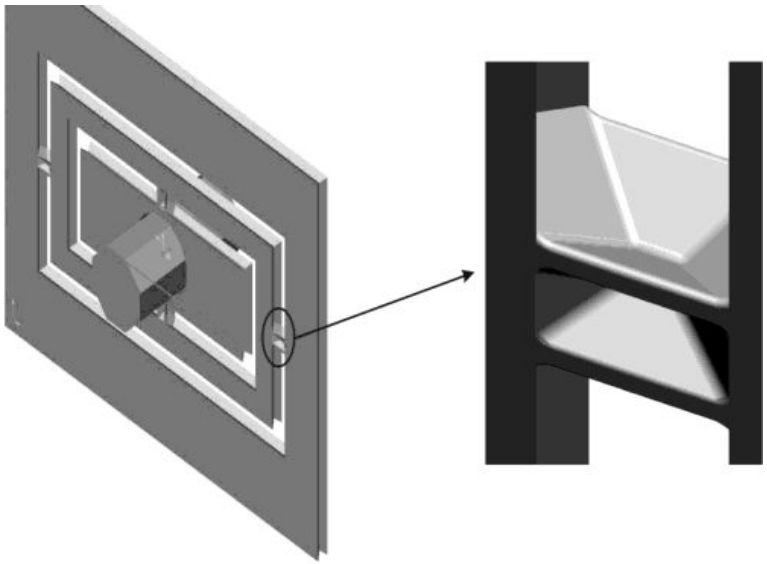
Базовые расчетные схемы ММГ RR – типа:
а) рамочный; *б*) роторный



Базовые расчетные схемы ММГ LL-типа
а) с одной инерционной массой; *б*) с двумя инерционными массами

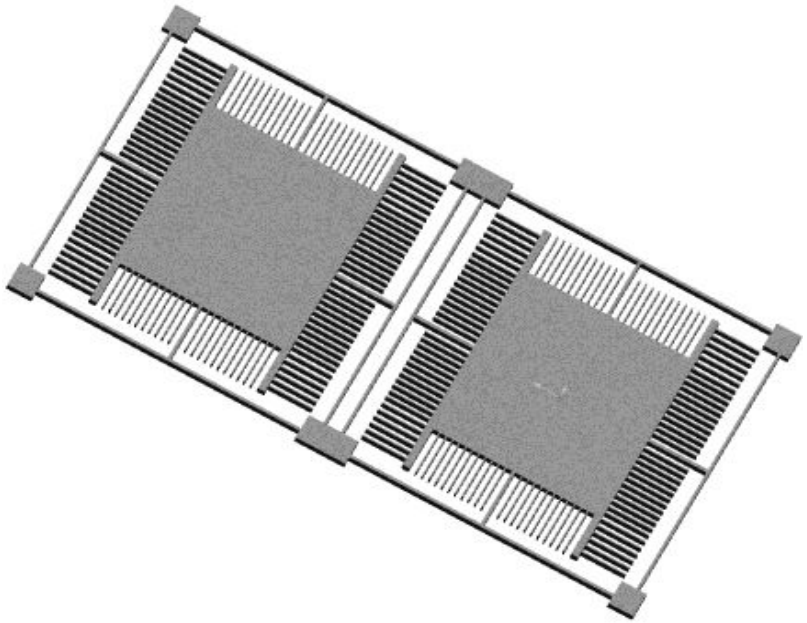
Подвесы с сосредоточенными параметрами

R-R тип

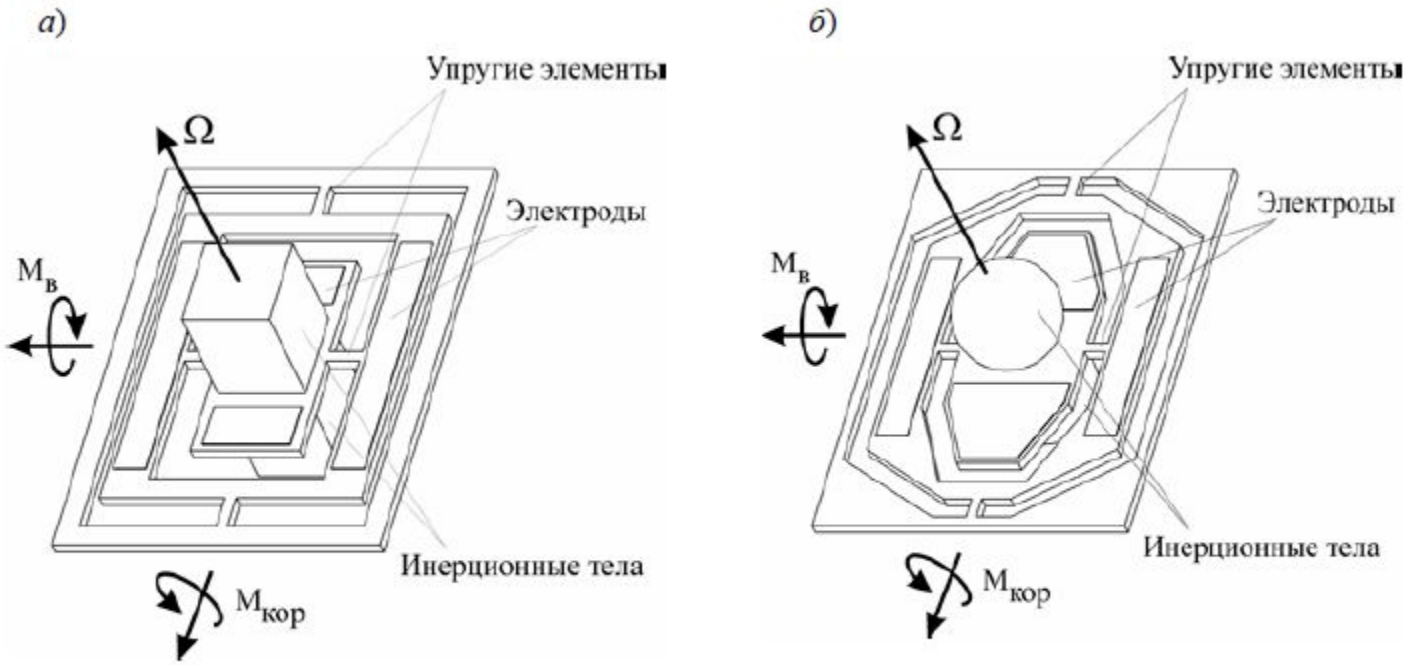


Достоинства: высокая добротность колебательного контура и высокая жесткость по паразитным степеням свободы, высокая чувствительность.
Недостатки: высокие требования к точности сведения резонансных частот

L-L тип

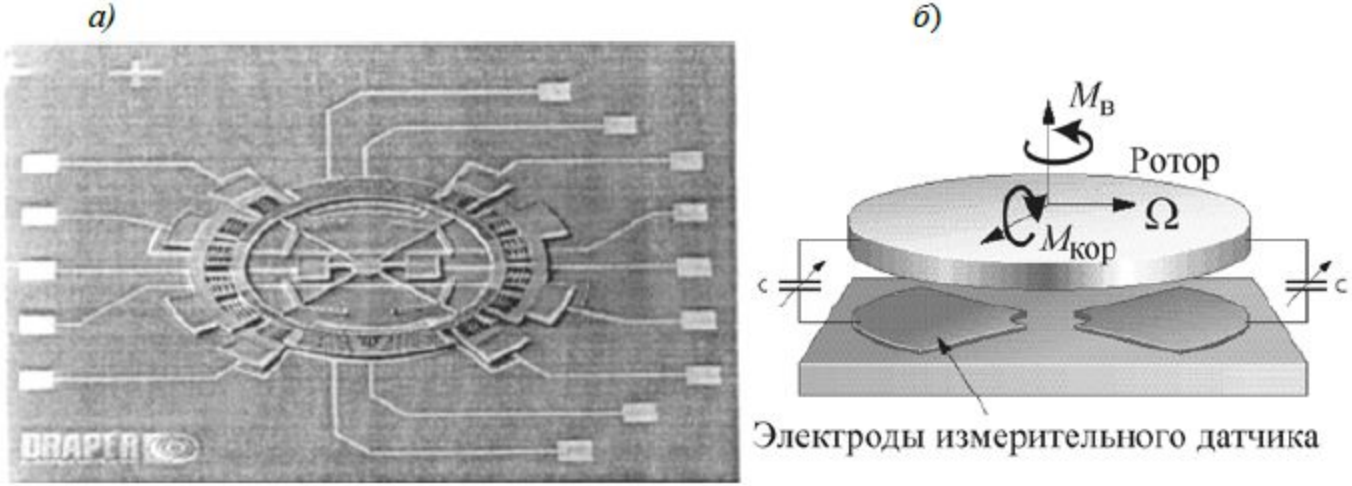


Достоинства: относительная простота и стабильность тех.процесса .
Недостатки: слабая устой- чивость к внешним возмущениям

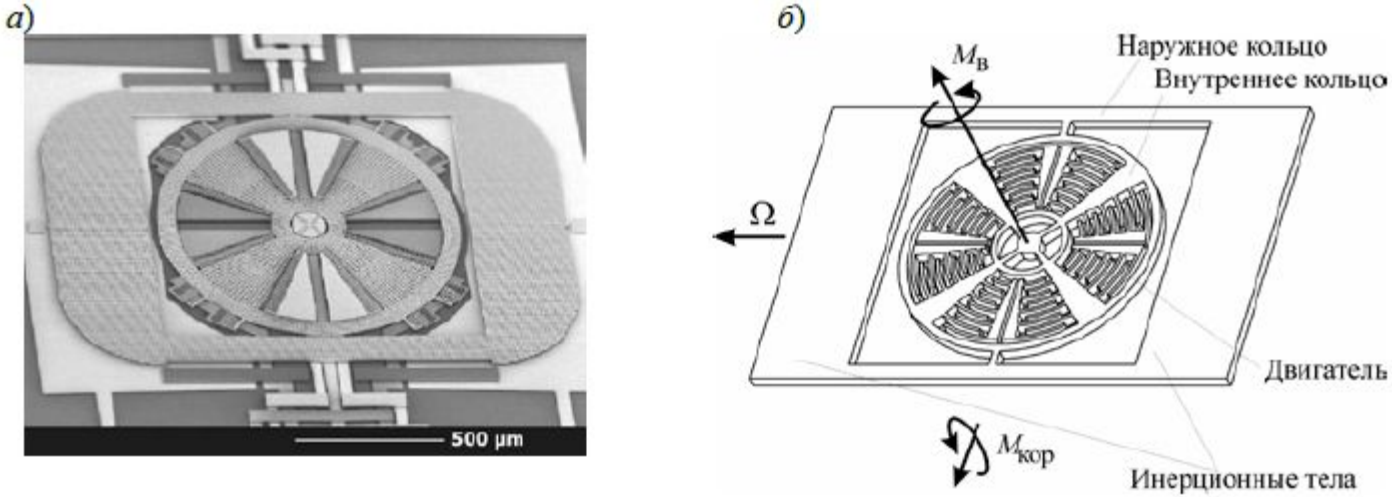


Конструкции с наружными кардановыми подвесами:
а) Draper Laboratory (США), *б) EADS, LG-MX Microsystems* (Германия)

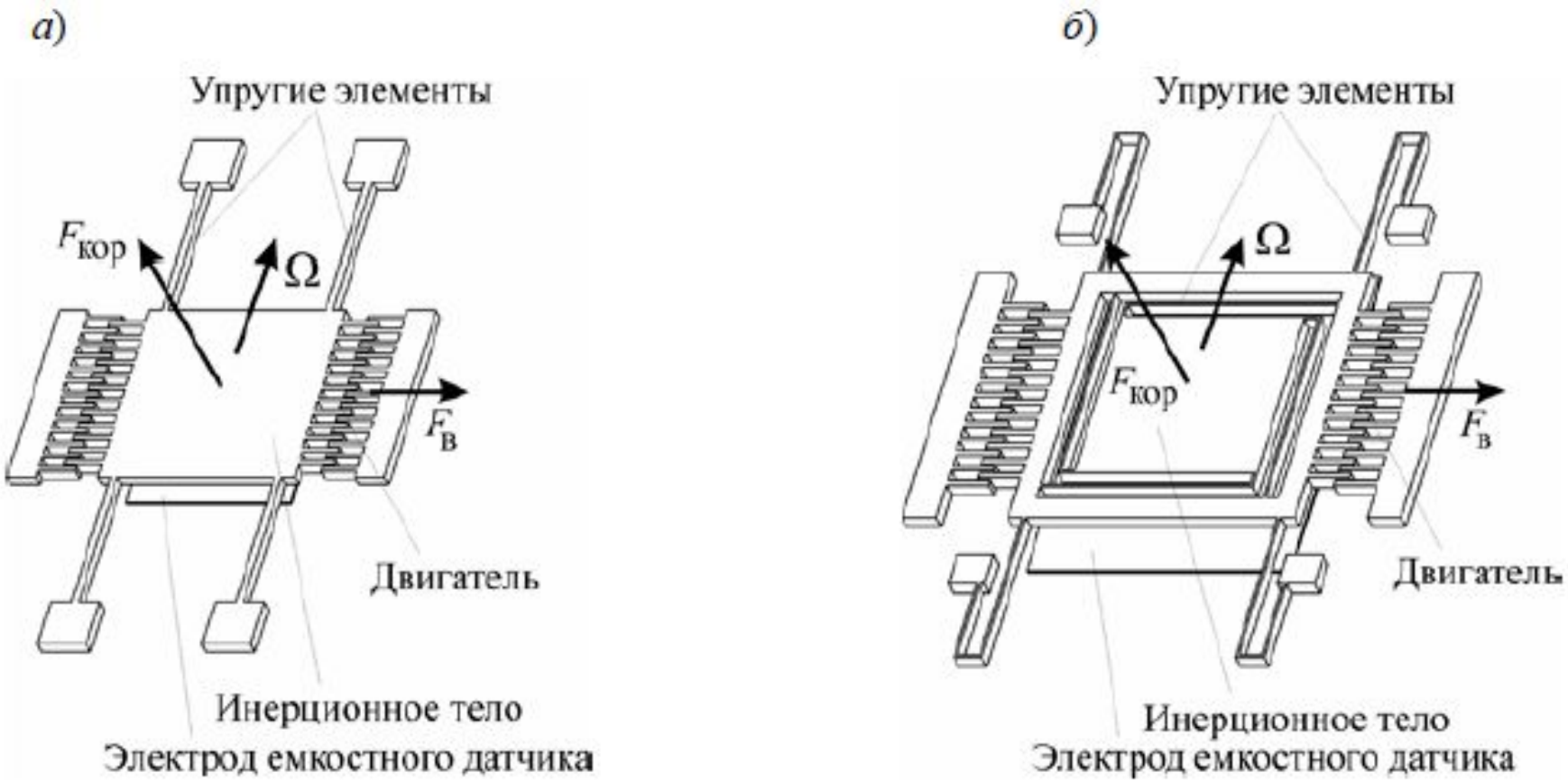
Недостатки: необходимость применения сборочных операций для закрепления инерционных масс, что значительно усложняет технологический процесс сборки и изготовления ММГ.



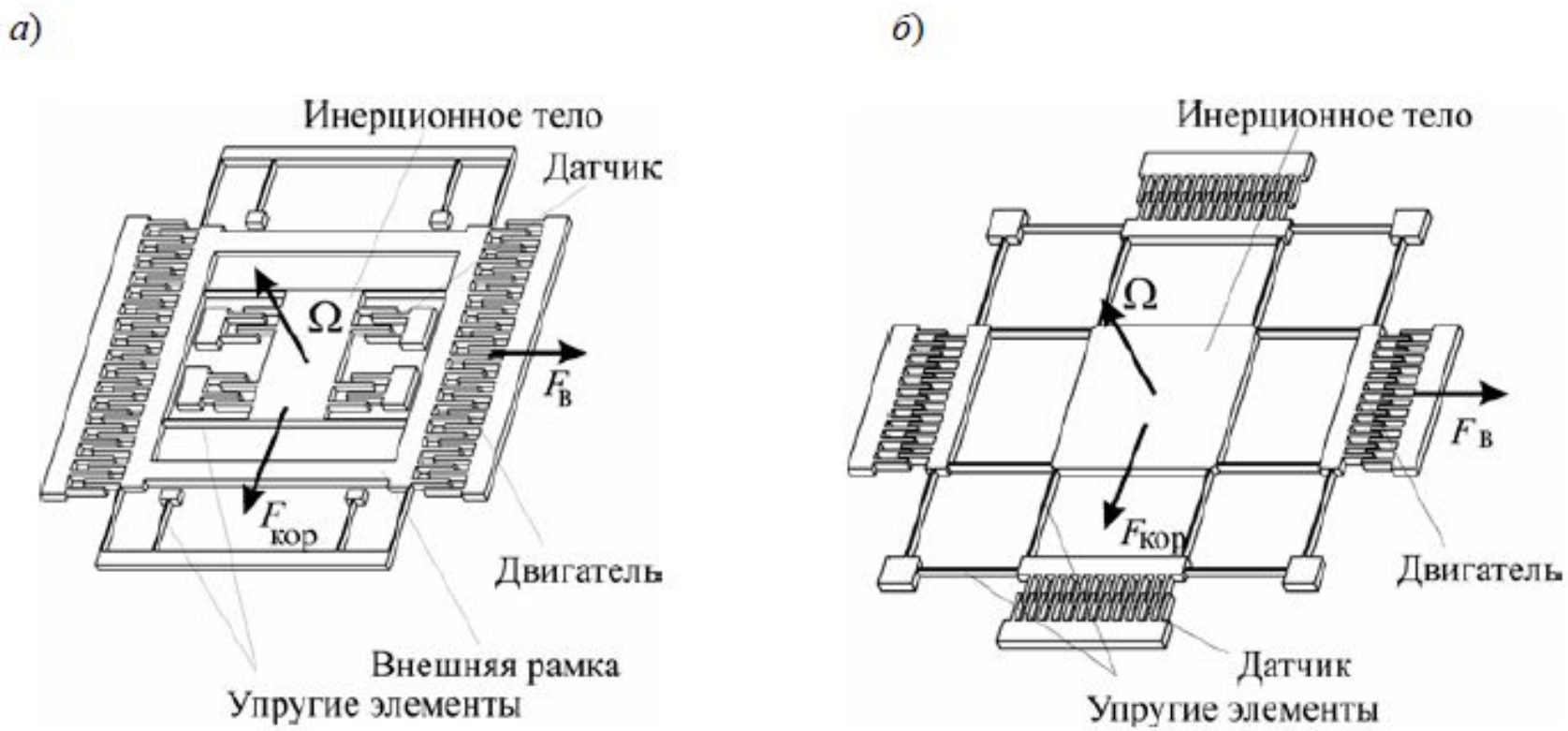
Гироскоп в виде диска *Draper Laboratory* (США):
а) общий вид; *б*) принципиальная схема



Микромеханический гироскоп MARS-RR:
а) общий вид гироскопа; *б*) принципиальная схема

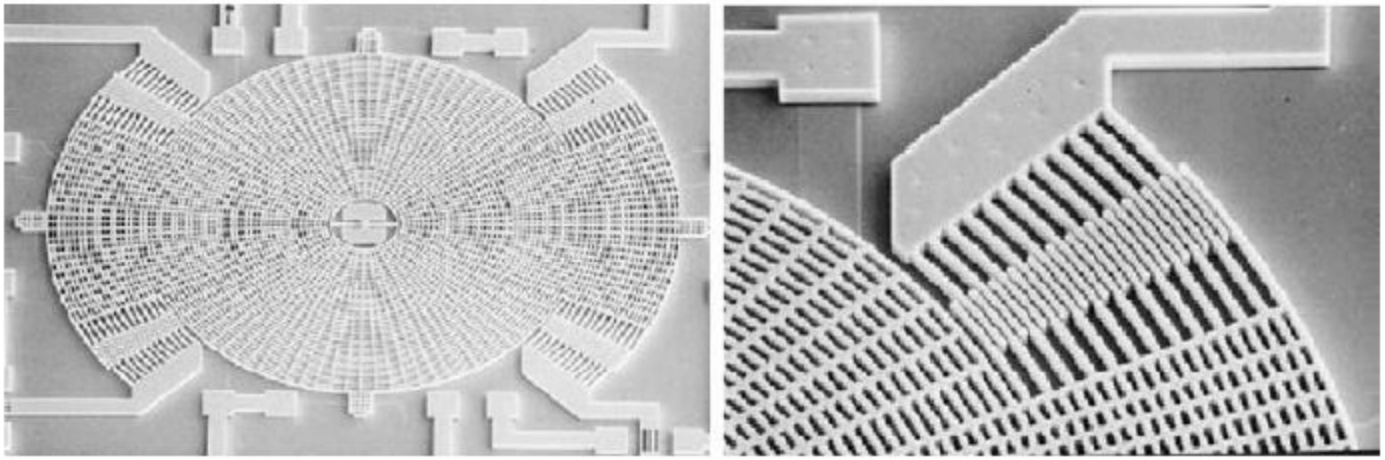


Конструкции стержневых подвесов с поступательными движениями:
а) *Toyota Central Research* (Япония); *б*) *Murata Manufacturing* (Япония)



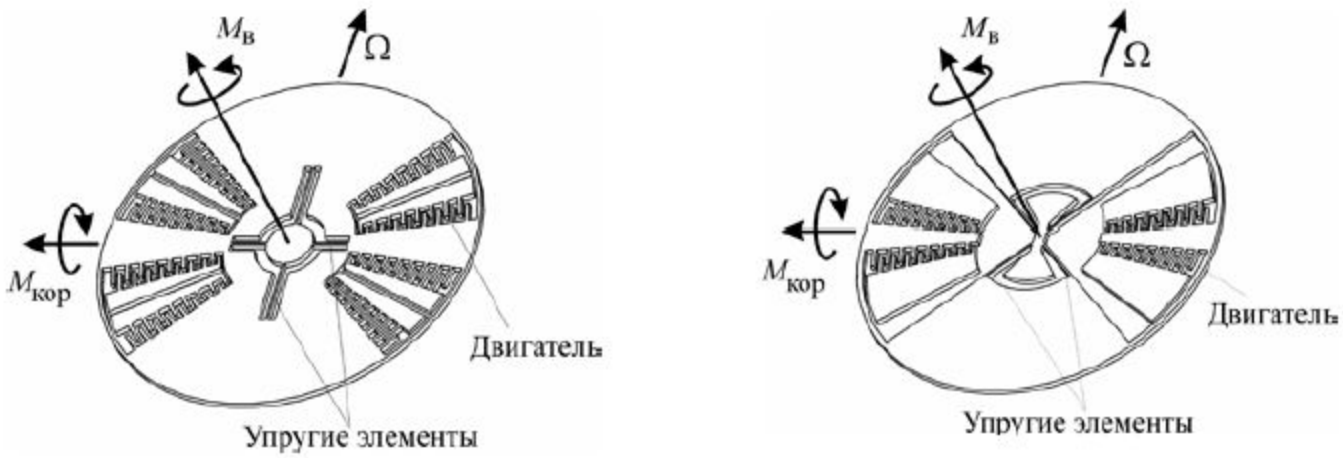
Конструкции с осью чувствительности, перпендикулярной плоскости гироскопа:
а) *HSG-IMIT* (Германия); *б*) *Carnegie Mellon University* (США)

а) *б*)



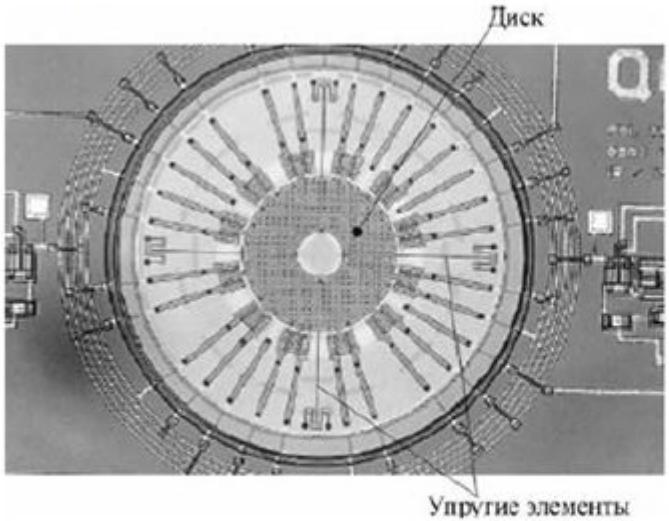
Разработка гироскопа фирмы *Bosch GmbH* (Германия):
а) общий вид, *б*) «гребенчатый» двигатель

а) *б*)

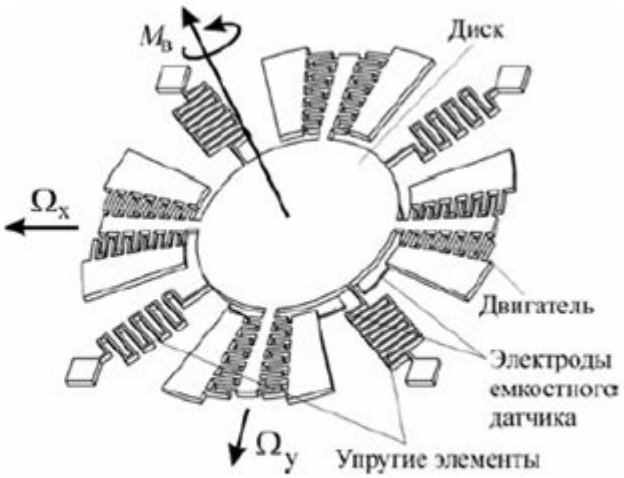


Конструкции отечественных одномерных ММГ:
а) *ЦНИИ «Электроприбор»*, *б*) *ЗАО «Гирооптика»*

а)

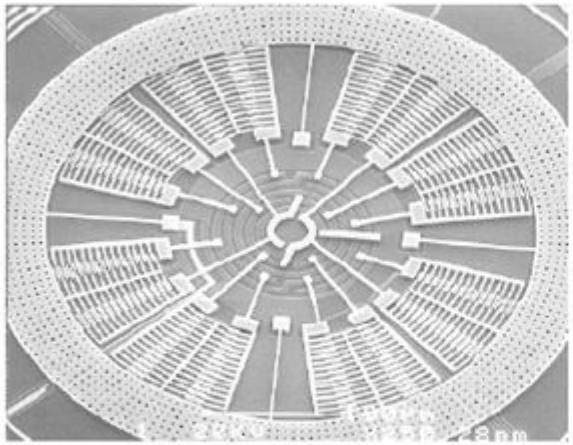


б)

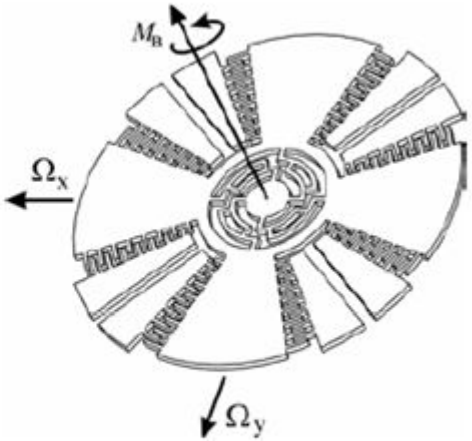


Конструкции двумерных ММГ с наружным подвесом:
а) Университет *Berkeley* (США), *б*) Институт технологии *Himeji* (Япония)

а)

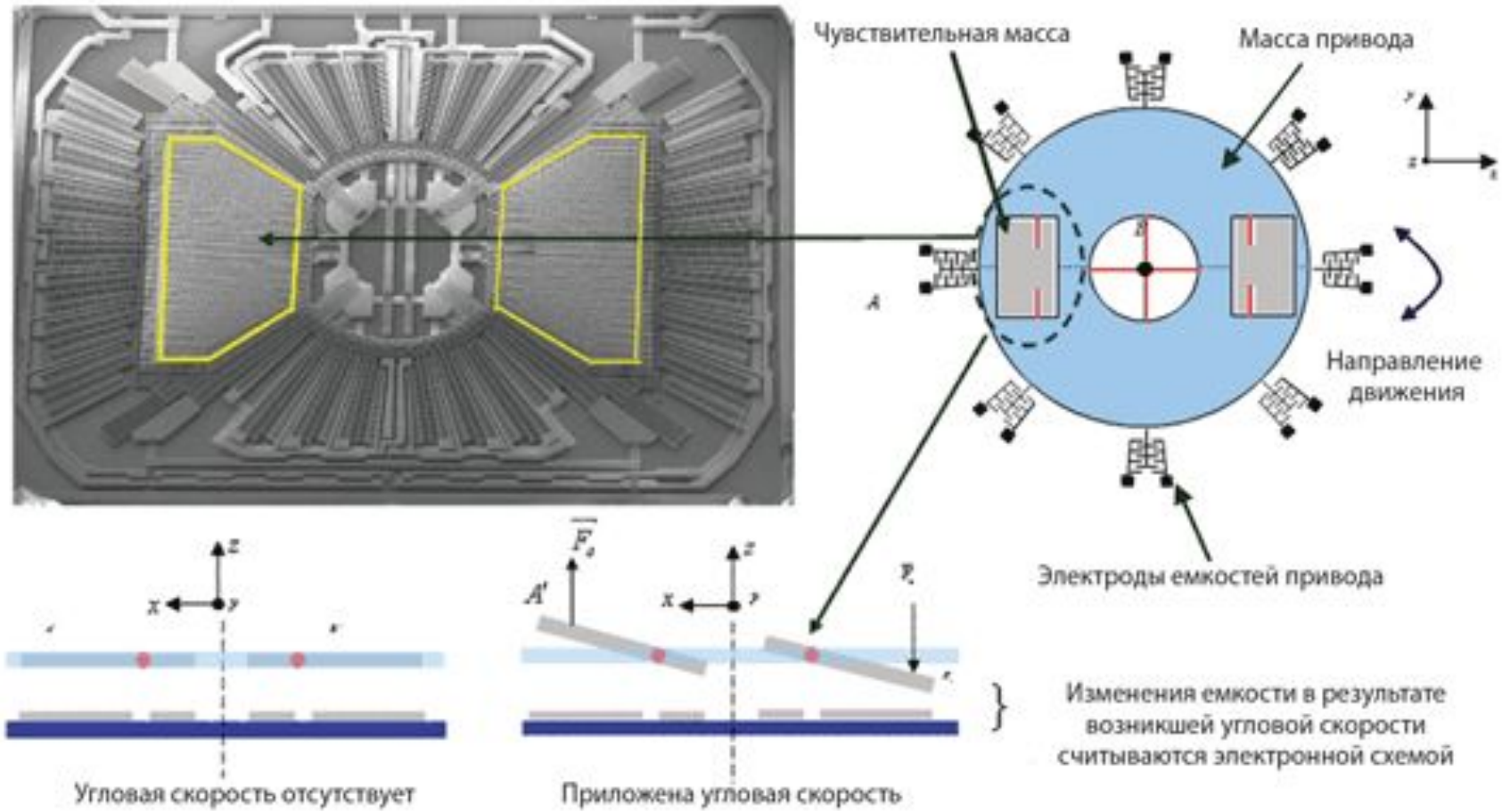


б)



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

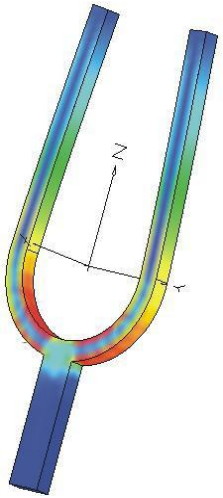
Поняли как работает?



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

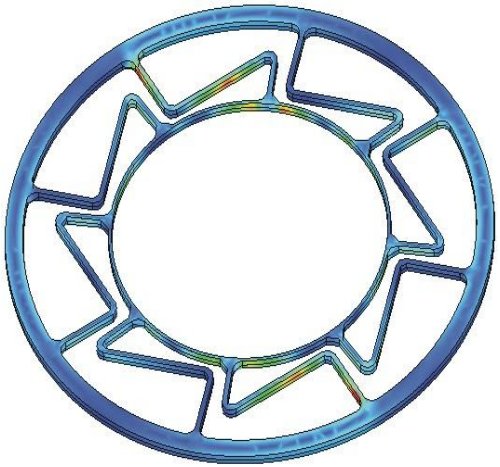
Подвесы с распределенными параметрами

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

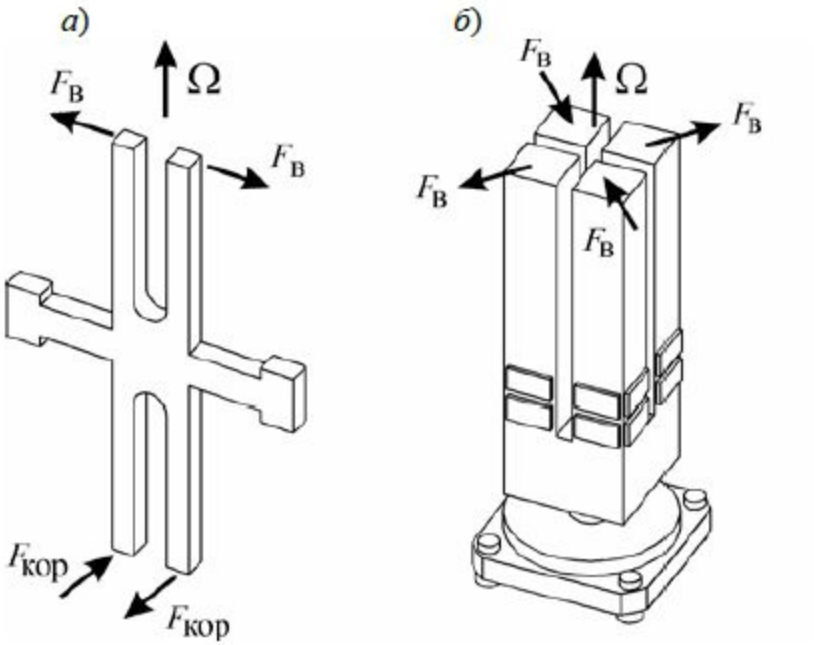
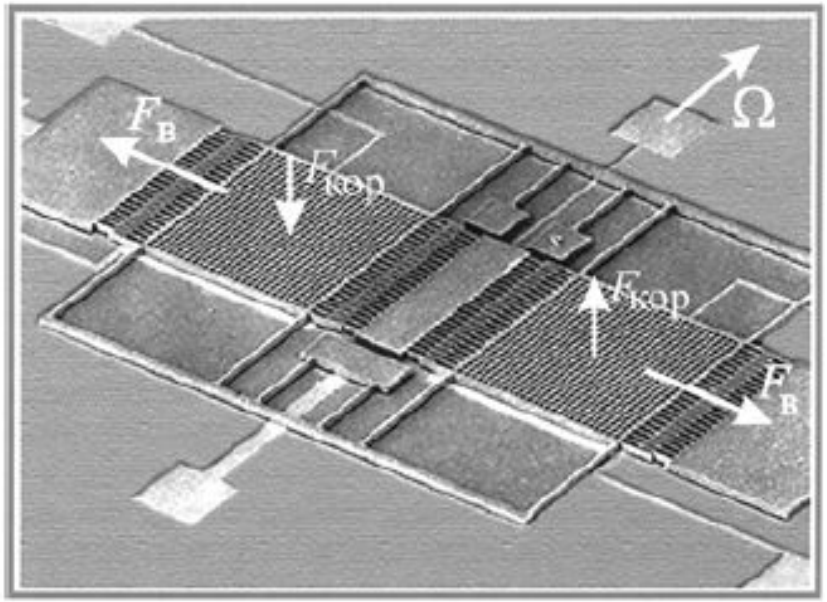
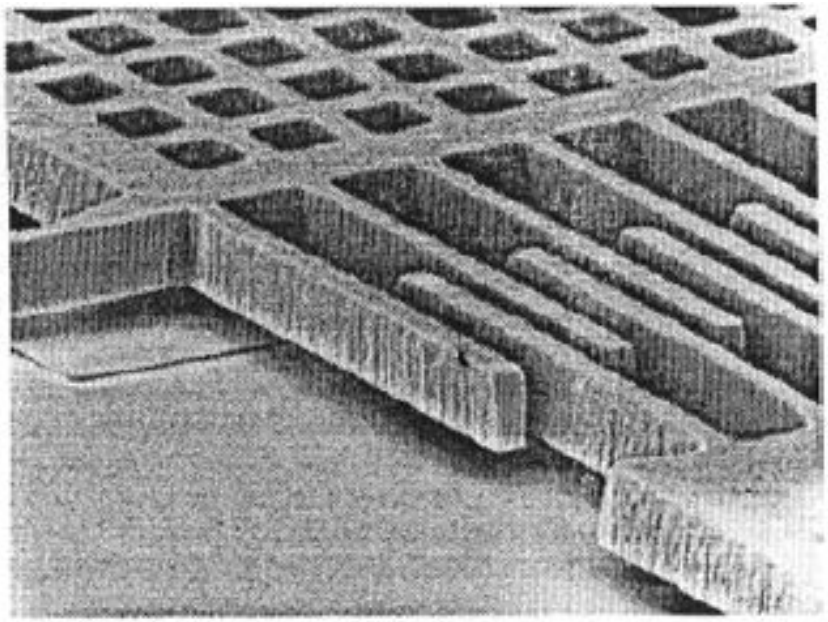


Рис. 11. Конструкции кварцевых камертонных ММГ:
а) *QRS11* (США), *б*) *Quapason*™ (Франция)

а)



б)



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

а) *б*)

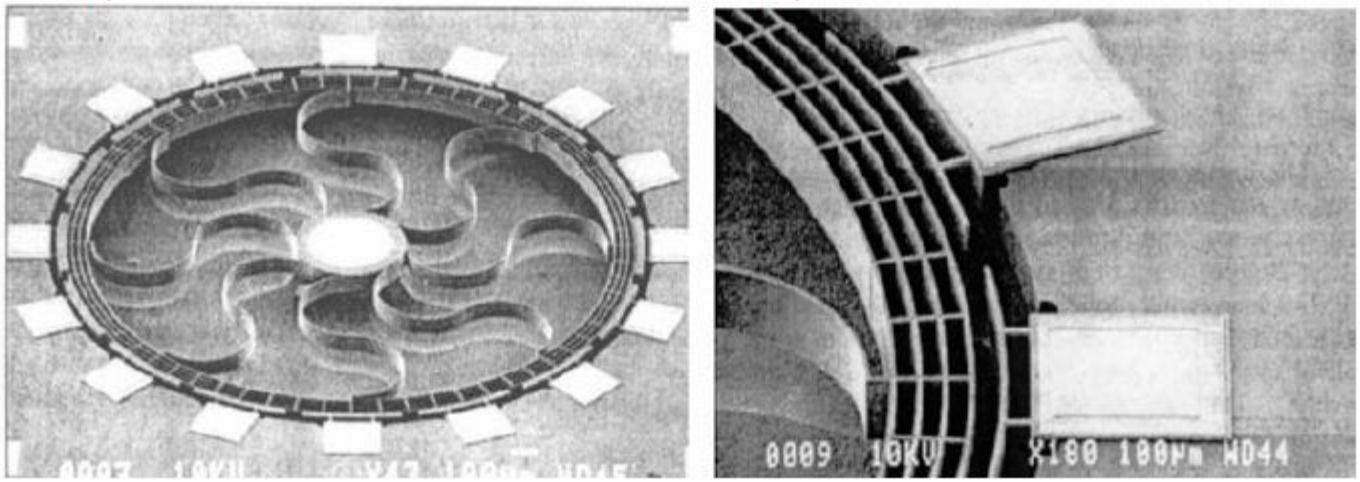


Рис. 13. Волновой ММГ университета *Michigan* (США):
а) общий вид гироскопа, *б*) исполнительные и измерительные датчики

а) *б*)

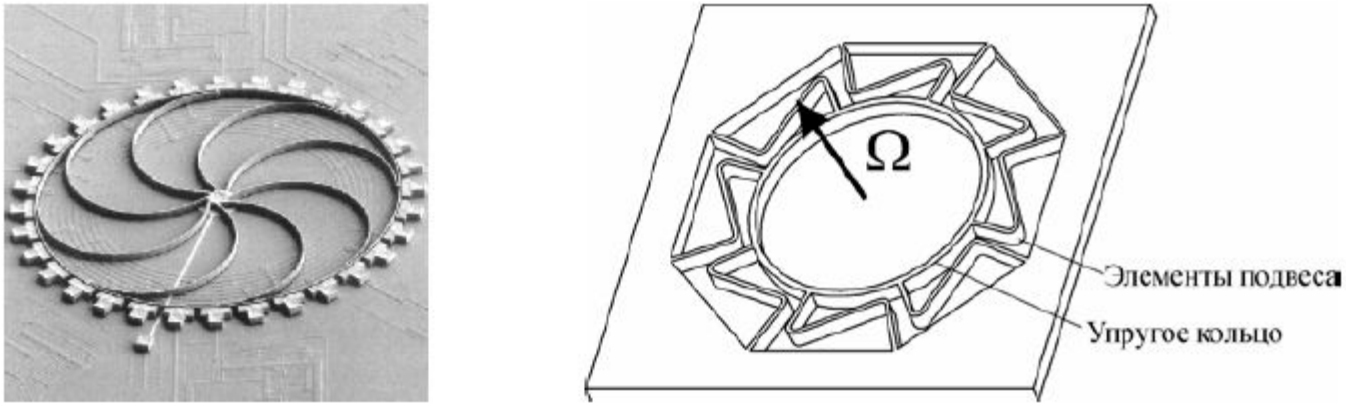


Рис. 14. Конструкции с упругим кольцом:
а) *Delco Electronics*, *б*) *British Aerospace*

Конструкции с бесконтактными подвесами

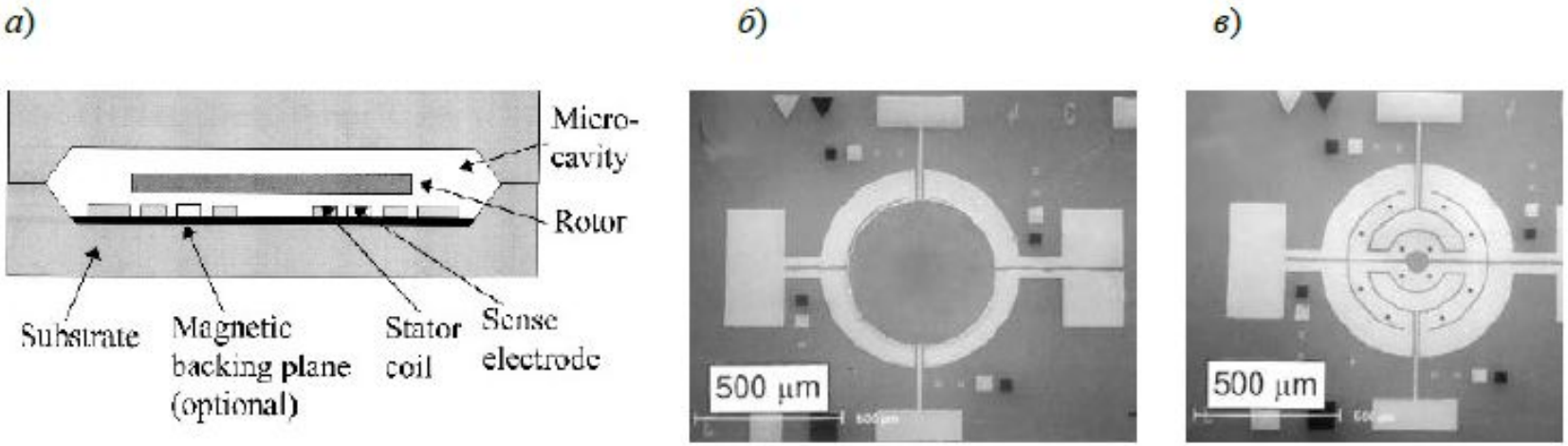


Рис. 15. ММГ с бесконтактным подвесом ротора:
а) принципиальная схема, *б*) ротор, *в*) подвес

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.

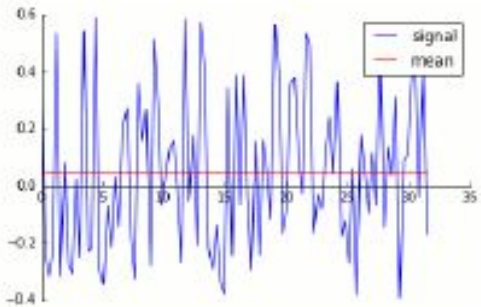
Сравнение некоторых характеристик типов

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

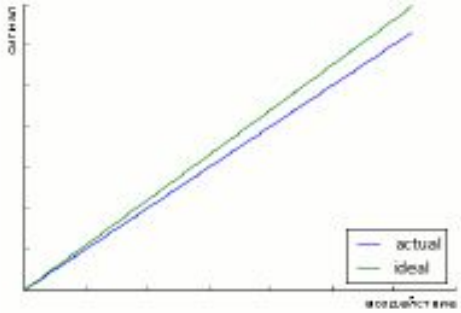
Смещение нуля (Zero offset)

- Воздействие отсутствует, но сигнал ненулевой
- Для акселерометра: ~ 80 mg
- Для гироскопа: $\sim 1^\circ/c$



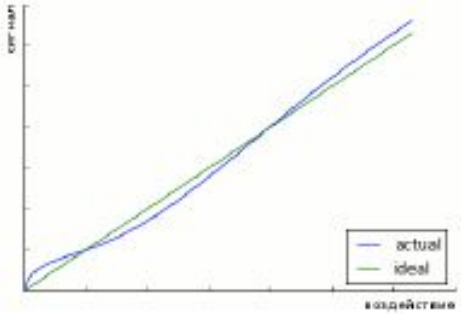
Погрешность чувствительности (Sensitivity tolerance)

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



Нелинейность (Non-linearity)

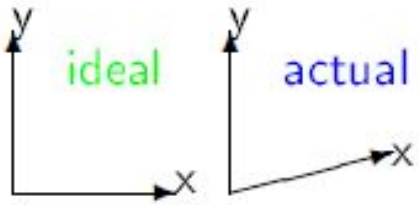
- Отклонение соотношения воздействие-сигнал от линейной модели
- Для акселерометра: 0.1–2 %
- Для гироскопа: 0.01–0.2 %



Систематические погрешности

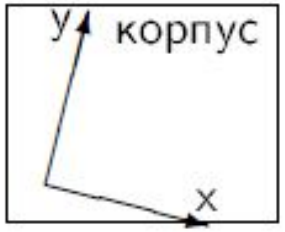
Неортогональность осей

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



Погрешность выравнивания

- Оси датчиков не коллинеарны плоскостям корпуса
- Для акселерометра: ~0.5 %
- Для гироскопа: ~0.5 %



Взаимовлияние воздействий

- Ускорение влияет на показания гироскопа: 0.05–0.1 °/с на 1 g.
- Влияние вибраций на показания гироскопа

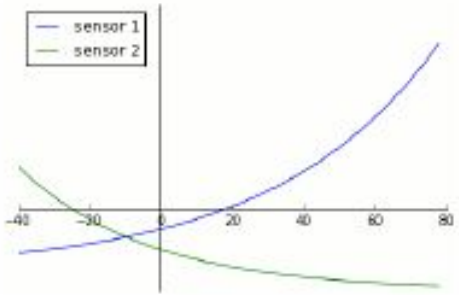
Систематические погрешности

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:

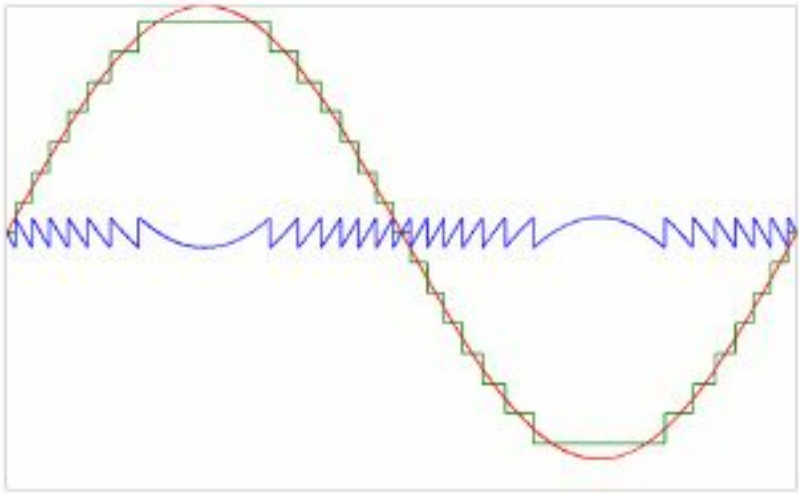
- смещение нуля
  - для акселерометра: 0.1–1 mg на 1°C
  - для гироскопа: 0.01–0.05 °/с на 1°C
- чувствительность
  - для акселерометра: 0.005–0.01 % на 1°C
  - для гироскопа: 0.005–0.01 % на 1°C

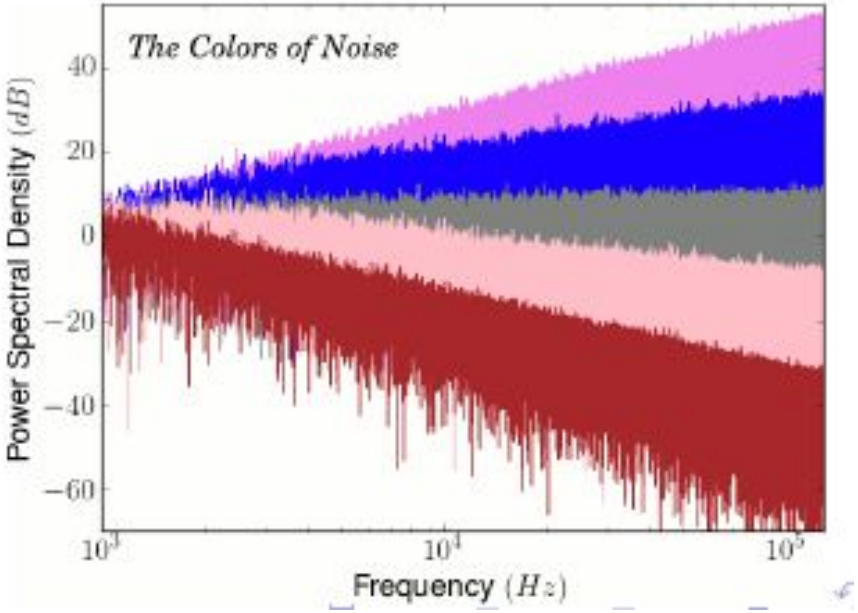


Причём для каждого датчика такая зависимость может быть уникальной (нет общей модели для датчиков данного вида).

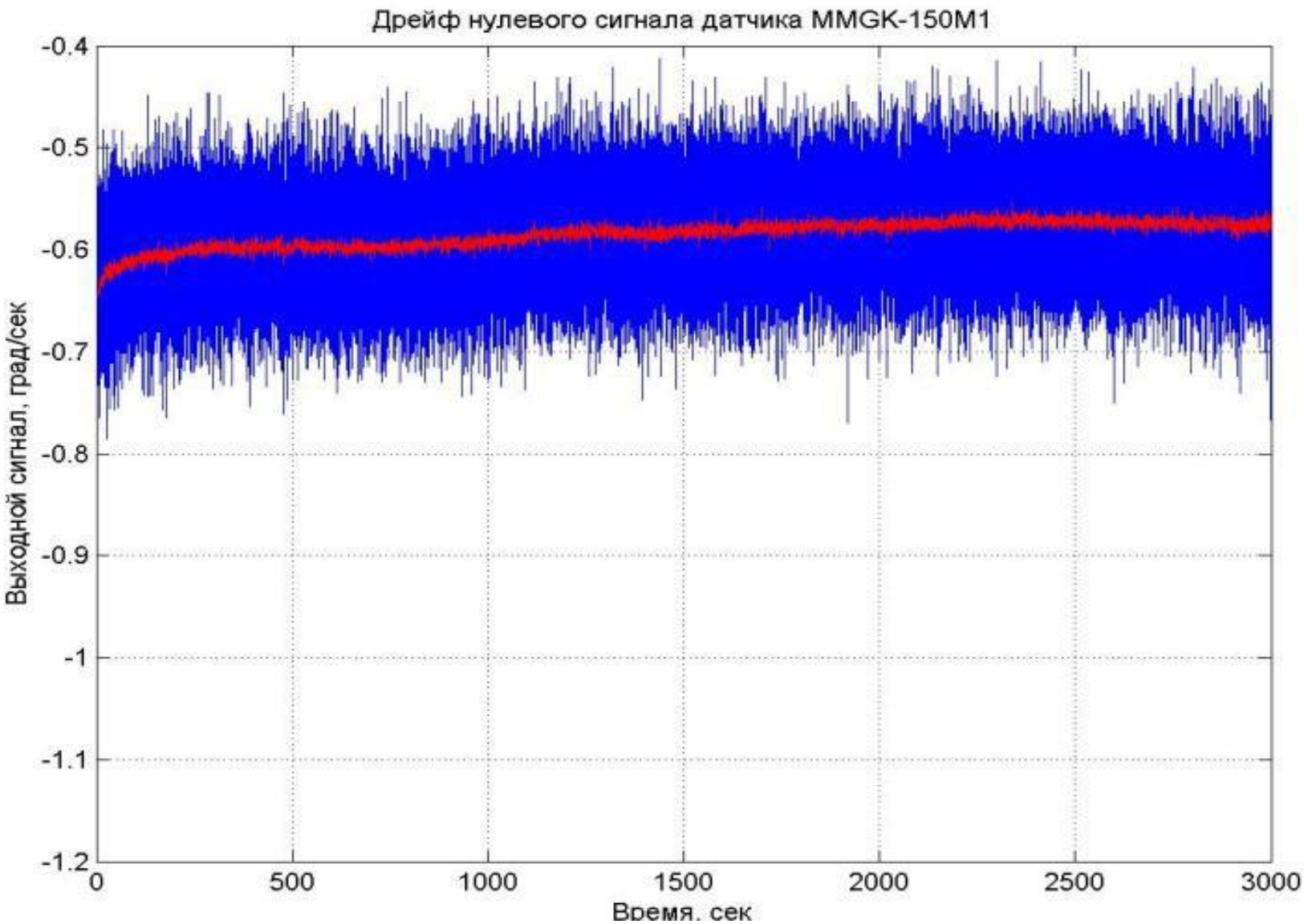
Случайные погрешности

- 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



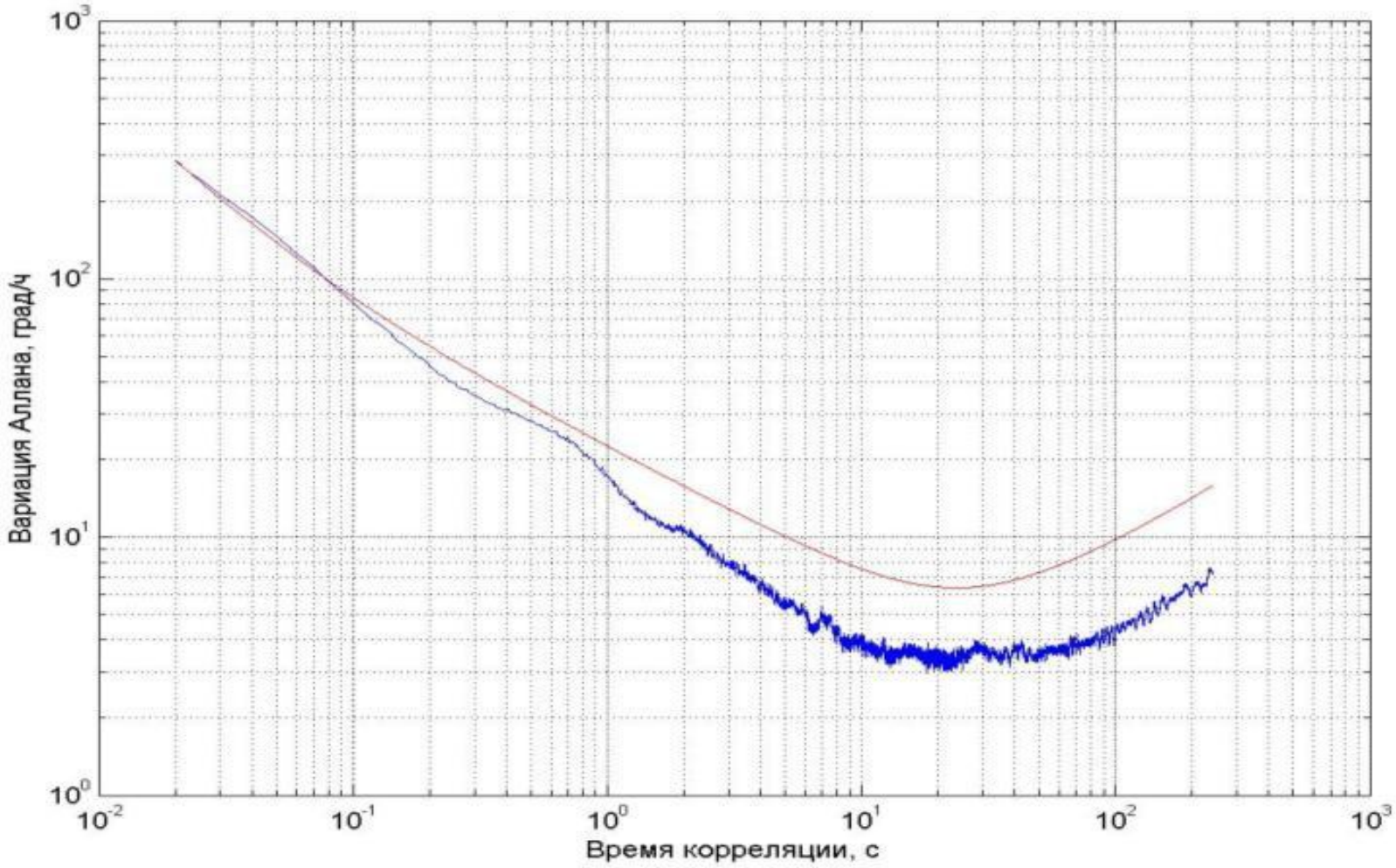


Характеристики микрогироскопа



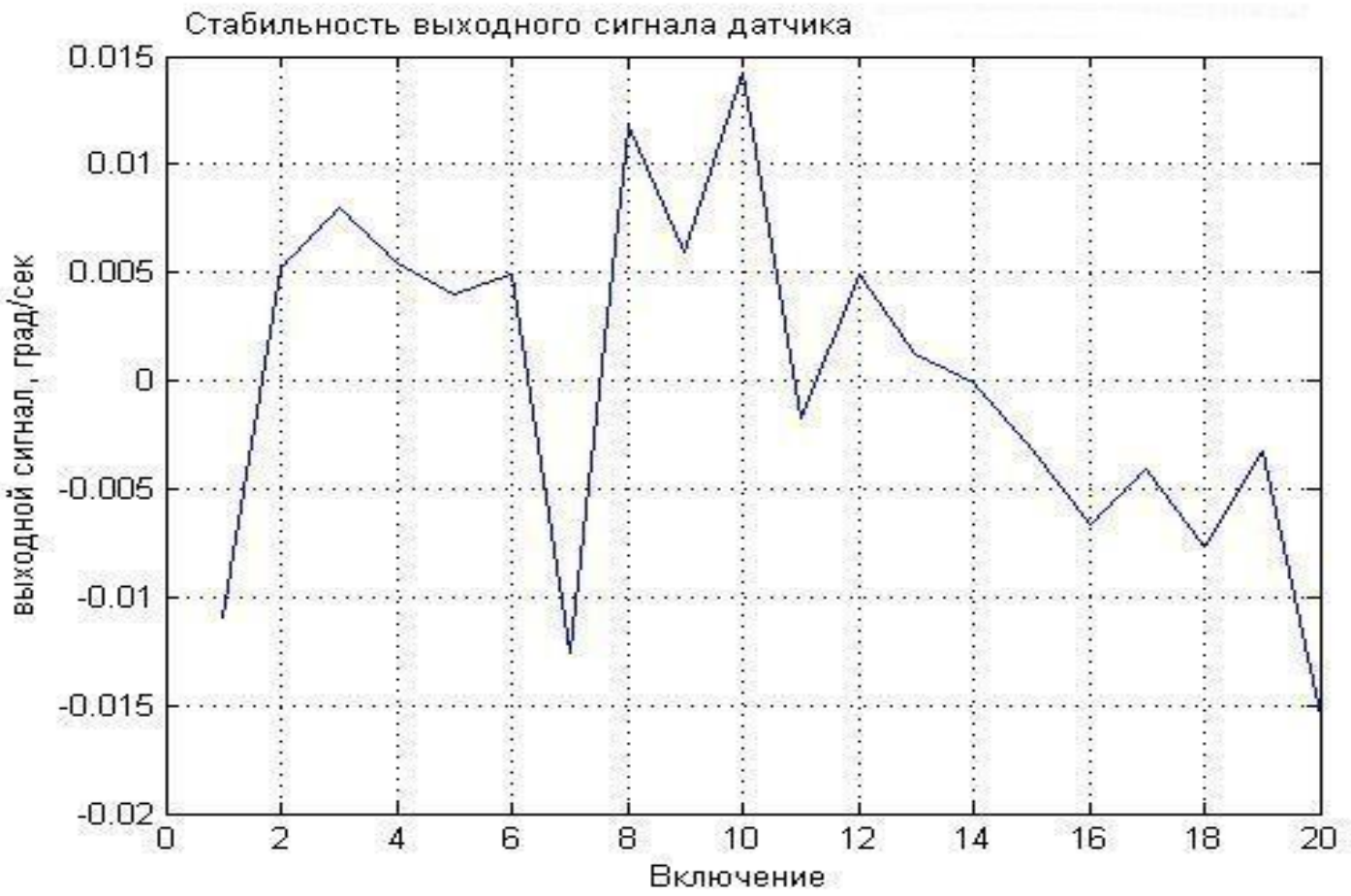
Случайная составляющая нулевого сигнала (в полосе 1Гц)

Характеристики микрогироскопа



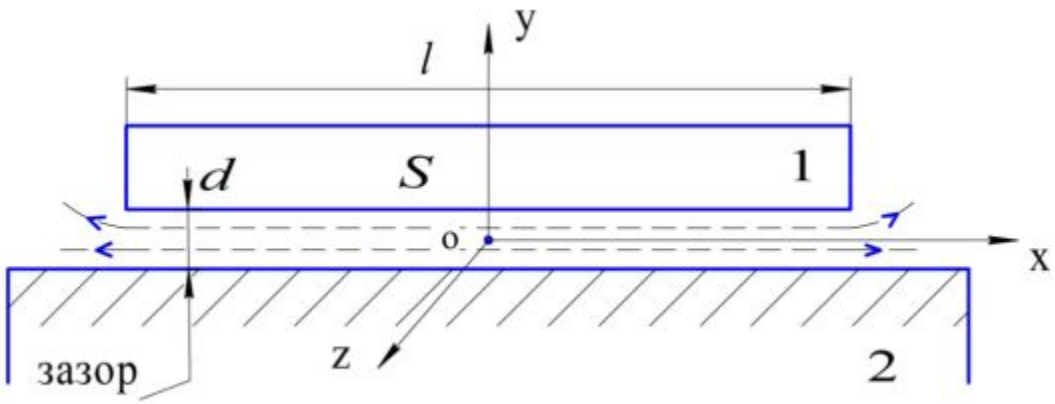
Вариация Аллана типового ДУС серии ММГК (микромеханический волновой гироскоп кольцевого типа).
Нестабильность нуля составляет 3,5 град/ч.

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



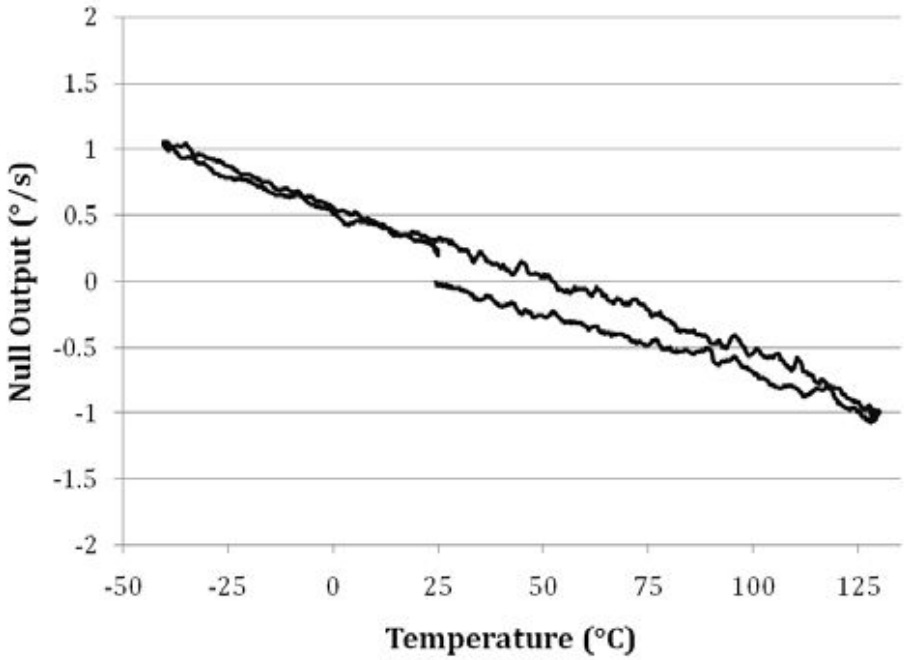
Структурная схема газового течения в тонком зазоре МЭМС

Характеристики: динамические частотные

Газ	C [K]	T_0 [K]	μ_0 [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

$$k_Д = \frac{F_Д}{v} \qquad \mu = \mu_0 \frac{(C_T + 1)\cdot \tau^n}{C_T + \tau} \qquad k_{Дx} = \mu_0 \frac{2\mu S^3}{d^3[(S/d)^2 + l^2]}$$

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

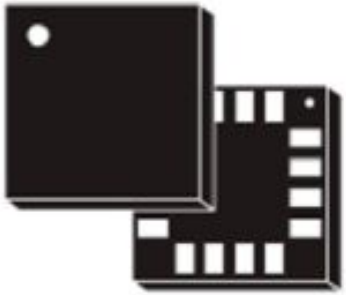
Manufacturer	g^2 Sensitivity (°/s/g^2)	Bias Stability (°/h)
Analog Devices	0.0001	8
Melexis	Not Specified	17
Silicon Sensing	0.005	5
VTI	Not Specified	2.1

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

	I3G4250D	BMO055
Производитель	STMicroelectronics	Bosch
		
Ед. измерения: °/с или рад/с		
Размеры, мм	$4 \times 4 \times 1.1$	$3.8 \times 5.2 \times 1.13$
Диапазон, °/с	± 2000	± 2000
Разрешение 1 LSB, °/с	0.07	0.06
Разрядность, бит	16	16
Частота измерений, Гц	$\leqslant 840$	$\leqslant 100$
Напряжение питания, В	2.4–3.6	2.4–3.6
Ток потребления, мкА	5–6100	330–12300
Рабочий диапазон, °C	−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

Output
A: Analog
D: Digital

Package
L: LGA
Q: QFN
S: SO

Package size
_: Normal
C: Compact

LSM 3 0 3 D L HC

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

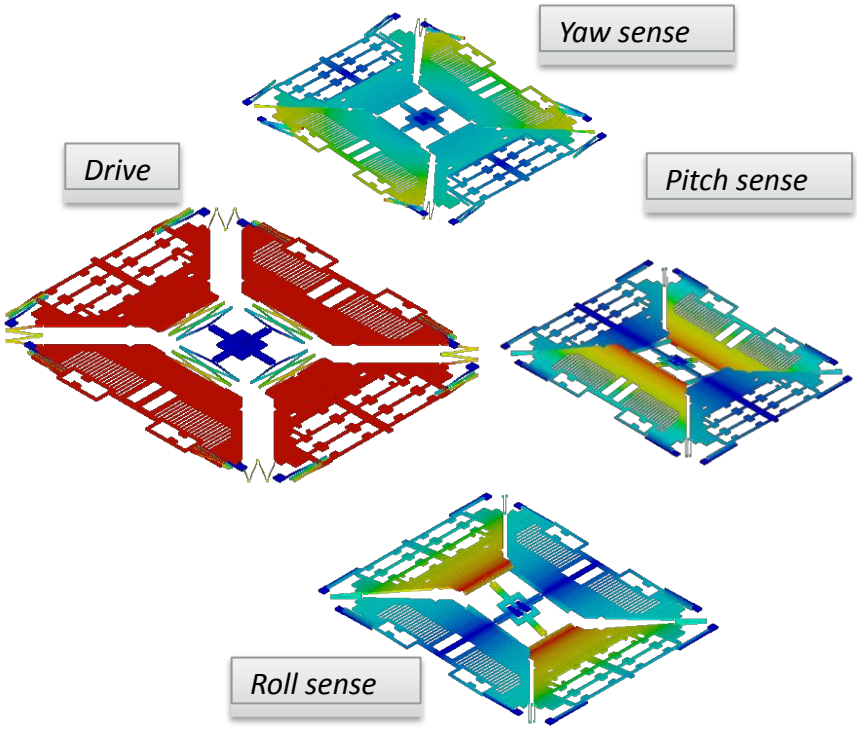
Number of Gyro Axis
0: No gyroscope

Number of Magneto Axis
3: 3-Axis Magnetometer

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: ±250°/с, ±500°/с и ±2000°/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 шоковая устойчивость: 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

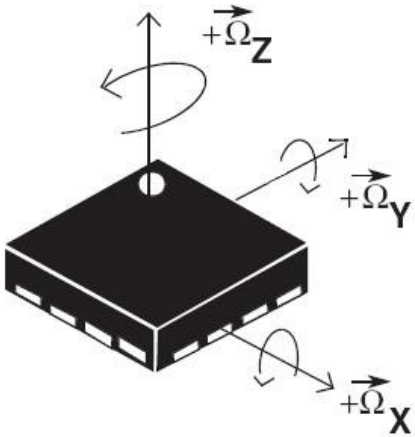
- **3-Осевой Аналоговый Гироскоп**
- **Иммунитет к аналоговому шуму и вибрациям**
- **2** шкалы измерения: ±625°/с и ±2500°/с
- Power down и Sleep режимы
- Функция **самотестирования**
- Заводская калибровка
- **Высокая чувствительность**: 2 мВ/°/с при 625°/с
- Встроенный фильтр нижних частот
- Высокая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

A3G4250D: 3-осевой гироскоп для автомобильного рынка

A3G4250D

Automotive – **3** axes – **G**yroscope – **4**x4 LGA 16L– **±245**dps full scale – **D**igital 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



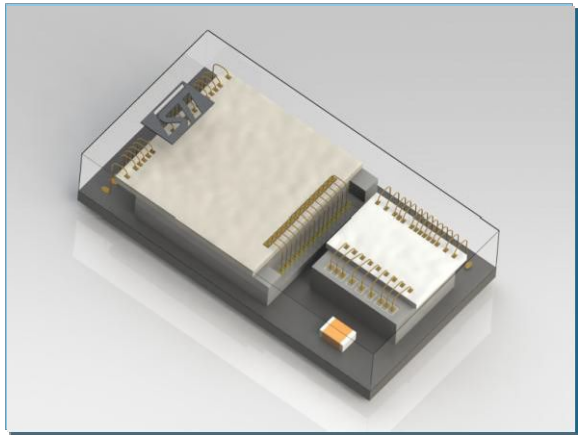
МЭМС IMU (iNEMO - Inertial Movement Unit)

МЭМС модуль – iNEMO Inertial Module

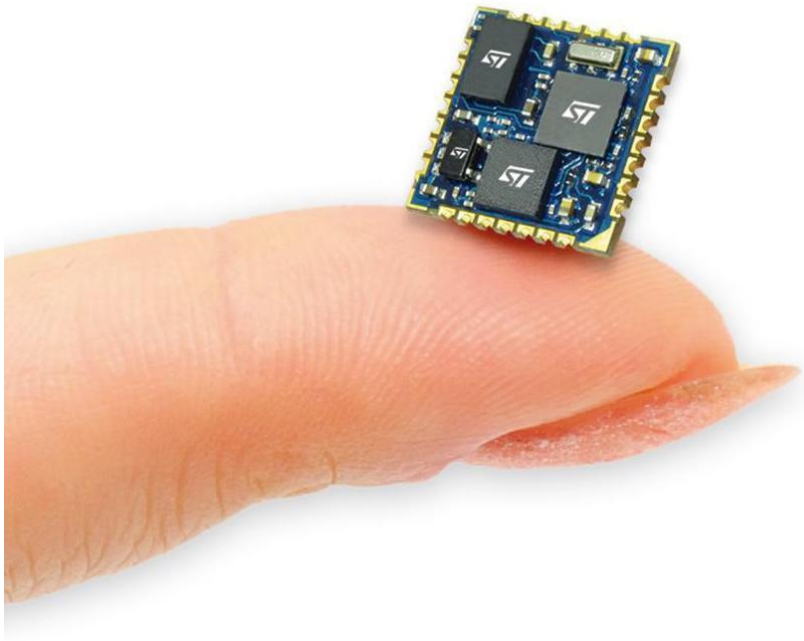
LSM330D:

- МЭМС Акселерометр + Гироскоп
  - 3-осевой акселерометр, ±2 ±4 ±8 ±16g
  - 3-осевой гироскоп, ±250 ±500 ±2000 dps
  - SPI/I²C 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

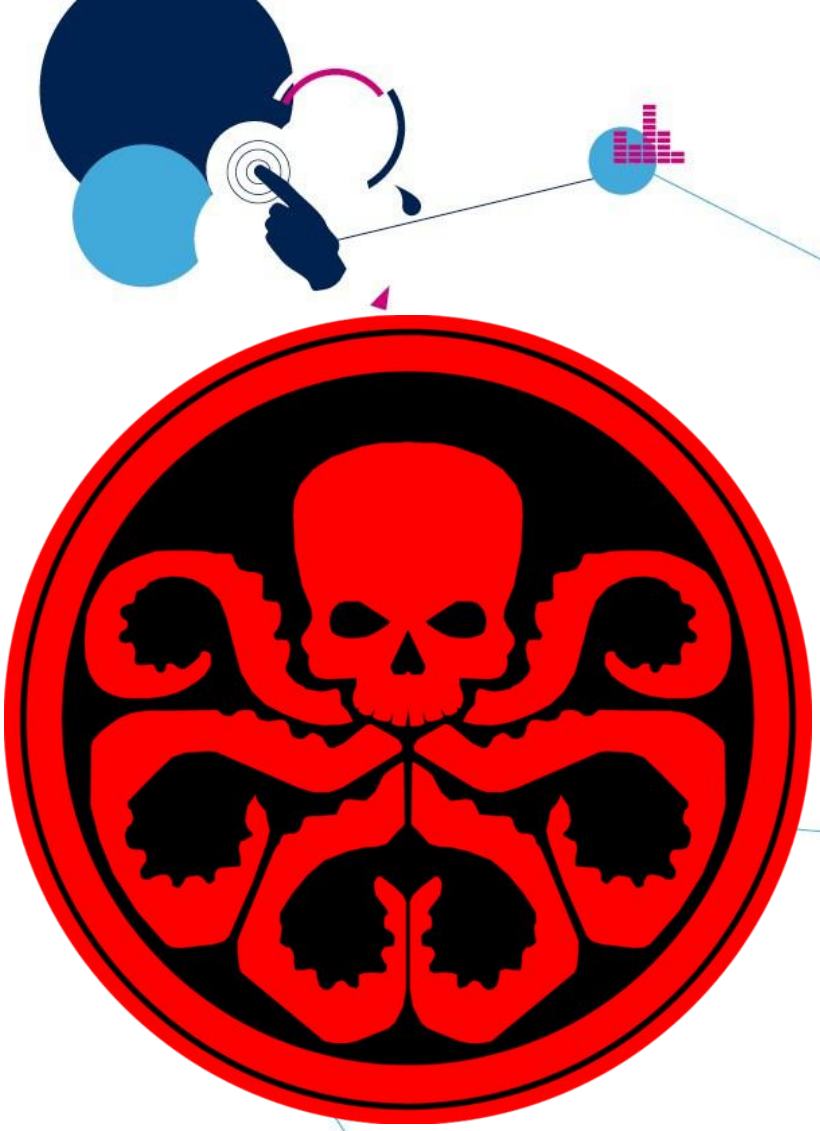


INEMO-M1

- 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^2C; 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)**

Источники

1. **habrahabr.ru** Сравнение характеристик микромеханических гироскопов
2.**Бабур Н ., Ш мидт Д ж.** Направления развития инерциальных датчиков//Гироскопия и навига-
ция. – 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 гироско-
пов//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.



Спасибо за внимание