

**Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции  
и ордена Трудового Красного Знамени  
государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**

---

Джепаров И.Э., Кулешов А.В., Фатеев В.В., Щеглова Н.Н.

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**к лабораторной работе по курсу  
«Гирскопические приборы и системы ориентации»**

**Микромеханический датчик угловой скорости  
(вибрационный гироскоп L-L типа)**

**Цель работы** – ознакомление с принципом действия, конструкцией и погрешностями микромеханического ДУС на базе вибрационного гироскопа L-L типа. Определение основных характеристик ДУС.

**Назначение прибора** – измерение угловой скорости основания в инерциальном пространстве.

В зависимости от типа собственного движения чувствительного элемента гироскопа все ВГ делятся на роторные (РВГ: собственное движение чувствительного элемента – вращение с постоянной угловой скоростью) и осцилляторные (ОВГ: собственное движение чувствительного элемента - гармонические колебания).

Любой осцилляторный микромеханический гироскоп представляет собой тело или несколько тел в упругом подвесе, имеющие две степени свободы и совершающие по этим осям какого-либо рода механические колебания. Причем в зависимости от схемы прибора участвовать в этих колебаниях может, как только одно тело, так и несколько тел сразу. Колебания чувствительного элемента гироскопа, создаваемые системой возбуждения со специальным приводом будем называть первичными или колебаниями по оси возбуждения. Вращение основания с абсолютной угловой скоростью приводит к возникновению кориолисовых сил инерции, разворачивающих вектор колебаний чувствительного элемента в плоскости, перпендикулярной измеряемой угловой скорости. В результате возникают так называемые выходные (вторичные) колебания чувствительного элемента или колебания по оси съема. Выходной сигнал гироскопа определяется по параметрам выходных колебаний чувствительного элемента и также имеет гармонический вид.

Оба движения – возбуждения и съема – в современных конструкциях могут быть как угловыми, так и поступательными. Таким образом, в каждом вибрационном гироскопе всегда сосуществуют два колебательных процесса, которые в силу возможных инструментальных погрешностей могут оказывать взаимное влияние друг на друга. Кроме того, каждое из этих колебаний тем или иным образом связано с корпусом, что приводит к взаимному влиянию корпуса и чувствительного элемента.

Настоящая работа посвящена исследованию микромеханического осцилляторного гироскопа ADXRS150EB фирмы Analog Device. В этом датчике колебания по

осям возбуждения и съема являются поступательными (линейными). Такие гироскопы относятся к вибрационным гироскопам L-L типа (от английского Linear-Linear).

В производстве датчика ADXRS150EB, как и в производстве других микромеханических датчиков, используются технологии изготовления полупроводниковых приборов, основной из которых является травление поли- и монокристаллического кремния и кварца.

Датчик ADXRS150EB является интегральным гироскопом, построенным на базе технологии iMEMS (integrated Micro Electro Mechanical System - интегрированные микроэлектромеханические системы), объединяющей на одном кремниевом кристалле датчик угловой скорости и электронику, обеспечивающую возбуждения первичных колебаний, формирование и предварительную обработку сигнала.

Подобная технология позволяет создавать надежные миниатюрные датчики угловых скоростей с очень малой массой, энергопотреблением и низкой стоимостью. Это значительно расширяет области применения гироскопических датчиков.

### **Кинематическая схема и принцип действия**

Кинематическая схема микромеханического ДУС типа L-L представлена на рис. 1.

Система координат OXYZ связана с корпусом прибора.

Ось OY называется осью возбуждения, ось OX - осью съема информации, а ось OZ является измерительной осью датчика.

Чувствительный элемент 1, подвешенный в рамке 2 с помощью упругих (внутренних) торсионов 3, обеспечивающих чувствительному элементу степень свободы вдоль оси OY. Рамка с чувствительным элементом с помощью упругих (наружных) торсионов 4 подвешена в основании 5, что обеспечивает чувствительному элементу степень свободы вдоль оси OX.

Специальная форма торсионов 3, 4 обеспечивает работу торсионов в большей степени на изгиб, значительно снижая при этом растяжение торсионов, что имело бы место при прямых торсионах. Таким образом, торсионы дают чувствительному элементу свободу линейных перемещений.

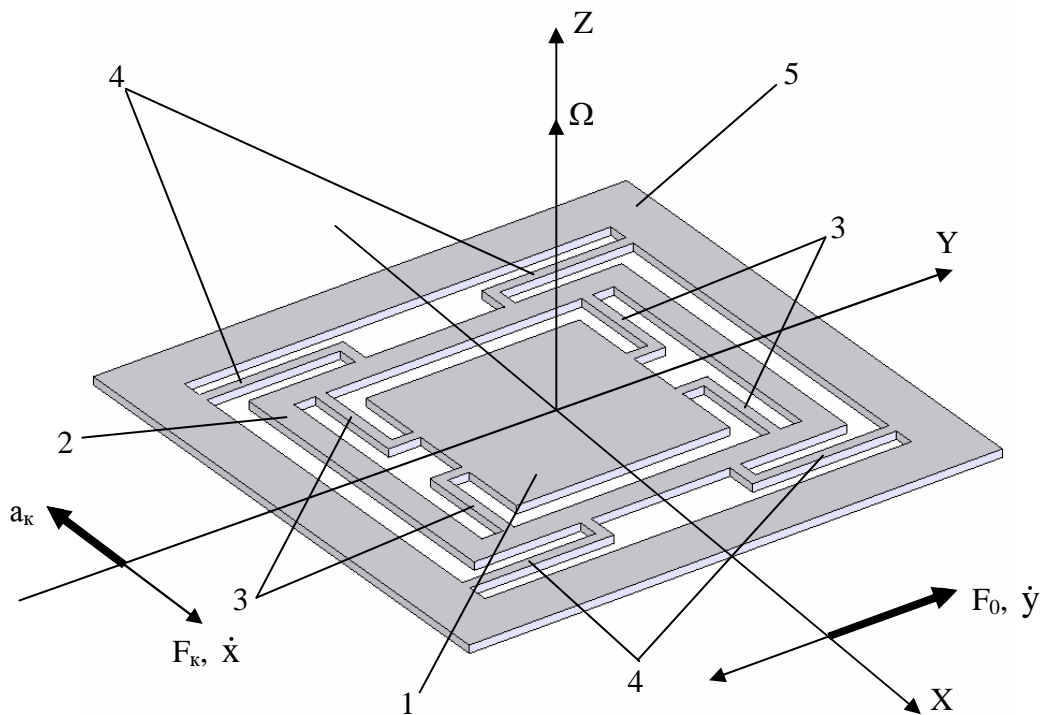


Рис. 1. Кинематическая схема вибрационного гироскопа L-L типа

С помощью системы возбуждения по оси  $OY$  создаются принудительные гармонические колебания чувствительного элемента со скоростью

$$\dot{y} = \dot{y}_0 \sin \omega t .$$

Вращение основания ДУС с угловой скоростью  $\Omega$  в абсолютном пространстве является переносным движением для чувствительного элемента 1. Движение чувствительного элемента с относительной скоростью  $\dot{y}$  и переносной скоростью  $\Omega$  приводит к возникновению ускорения Кориолиса

$$\vec{a}_k = 2\vec{\Omega} \times \vec{\dot{y}}$$

и силы инерции Кориолиса

$$\vec{F}_k = -m\vec{a}_k ,$$

модуль которой будет изменяться по гармоническому закону в соответствии с изменением линейной скорости  $\dot{y}$ . Силы инерции Кориолиса вызывают гармонические колебания рамки с чувствительным элементом вдоль оси  $OX$ , величина амплитуды которых пропорциональна измеряемой абсолютной угловой скорости основания  $\Omega$ .

## Уравнения движения

Приближенные уравнения движения центра масс чувствительного элемента могут быть записаны с помощью принципа Даламбера:

$$OX: \quad - (m_p + m_q) \ddot{x} - D_x \dot{x} - C_x x + 2m_q \Omega \dot{y} = 0$$

$$OY: \quad - m_q \ddot{y} - D_y \dot{y} - C_y y - 2m_q \Omega \dot{x} + F_0 \sin \omega t = 0,$$

где  $m_q$  – масса чувствительного элемента,  $m_p$  – масса рамки,  $x$ ,  $y$  – перемещения центра масс чувствительного элемента относительно системы координат, связанной с корпусом прибора,  $C_x, C_y$  – коэффициенты жесткости торсионов по осям  $OX$  и  $OY$  соответственно,  $D_x, D_y$  – коэффициенты демпфирования вдоль осей  $OX$  и  $OY$  соответственно,  $\Omega$  – измеряемая угловая скорость основания,  $F_0$  – амплитудное значение внешней силы системы возбуждения колебаний,  $\omega$  – циклическая частота колебаний по оси возбуждения.

В предположении малости влияния колебаний по оси съема на параметры движения по оси возбуждения величиной  $2m_q \Omega \dot{x}$  по сравнению с остальными моментами по оси  $OY$  можно пренебречь. Таким образом, уравнения движения принимают вид:

$$(m_p + m_q) \ddot{x} + D_x \dot{x} + C_x x = 2m_q \Omega \dot{y},$$

$$m_q \ddot{y} + D_y \dot{y} + C_y y = F_0 \sin \omega t.$$

Преобразуем уравнения движения по оси  $OY$ .

$$\ddot{y} + 2\xi_y \omega_0 \dot{y} + \omega_0^2 y = \frac{F_0}{m_q} \sin \omega t,$$

где  $\omega_0 = \sqrt{\frac{C_y}{m_q}}$  – частота собственных колебаний чувствительного элемента вдоль оси

$OY$  (резонансная частота по оси возбуждения),  $\xi_y = \frac{D_y}{2\sqrt{C_y m_q}}$  – относительный коэффициент затухания колебаний по оси возбуждения.

Под действием силы  $F_0 \sin \omega t$  чувствительный элемент совершает гармонические колебания по оси возбуждения, определяемые выражением:

$$y = \frac{F_0}{\sqrt{(C_y - m_q \omega^2)^2 + (D_y \omega)^2}} \sin \left( \omega t - \arctg \left( \frac{D_y \omega}{C_y - m_q \omega^2} \right) \right)$$

или

$$y = \frac{F_0}{C_y \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(2\xi_y \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \sin \left( \omega t - \arctg \left( \frac{2\xi_y \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} \right) \right) =$$

$$= \frac{F_0 \lambda_y}{C_y} \sin(\omega t + \chi_y),$$

где  $\lambda_y = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(2\xi_y \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}$  - коэффициент динамичности,

$$\chi_y = -\arctg \left( \frac{2\xi_y \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} \right) - \text{фазовый сдвиг.}$$

Для повышения чувствительности датчика колебания чувствительного элемента по оси возбуждения всегда осуществляются в резонансном режиме. В этом случае частота возбуждающей силы, а, следовательно, и частота колебаний чувствительного элемента равны частоте его собственных колебаний, то есть  $\omega = \omega_0$ . В резонансном режиме  $\lambda_y = \frac{1}{2\xi_y}, \chi_y = -\frac{\pi}{2}$ .

Для возбуждения колебаний используется режим автоколебаний с обеспечением стабилизации амплитуды колебаний.

В этом случае  $y = y_0 \cos(\omega t)$  и, соответственно,  $\dot{y} = \dot{y}_0 \sin(\omega t)$ .

При возникновении угловой скорости  $\Omega$  вращения основания вокруг измерительной оси OZ под действием кориолисовых сил инерции чувствительный элемент вместе с рамкой начинает совершать линейные колебания вдоль оси OX, которые по аналогии с осью OY можно получить, решая уравнение:

$$\ddot{x} + \frac{D_x}{(m_p + m_q)} \dot{x} + \frac{C_x}{(m_p + m_q)} x = \frac{2m_q}{(m_p + m_q)} \Omega \dot{y} \text{ или}$$

$$\ddot{x} + 2\xi v_0 \dot{x} + v_0^2 x = \frac{2m_q}{(m_p + m_q)} \Omega \dot{y},$$

где  $v_0 = \sqrt{\frac{C_x}{(m_p + m_q)}}$  - частота собственных колебаний вдоль оси ОХ (резонансная частота по оси съема),

$\xi_x = \frac{D_x}{2\sqrt{C_x (m_p + m_q)}}$  - относительный коэффициент затухания колебаний по оси съема.

Гармонические колебания по оси съема, по аналогии с колебаниями по оси возбуждения определяются следующим выражением:

$$x = \frac{2m_q \Omega \dot{y}_0 \lambda_x}{C_x (m_p + m_q)} \sin(\omega t + \chi_x),$$

где  $\lambda_x = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{v_0^2}\right)^2 + \left(2\xi_x \frac{\omega}{v_0}\right)^2}}, \chi_x = -\arctg\left(\frac{2\xi_x \frac{\omega}{v_0}}{1 - \frac{\omega^2}{v_0^2}}\right).$

В зависимости от соотношения резонансных частот по осям возбуждения и съема осцилляторные вибрационные гироскопы могут работать в двух режимах: дорезонансном, в том случае если резонансная частота по оси возбуждения меньше резонансной частоты по оси съема ( $\omega_0 < v_0$ ), и резонансном, когда резонансные частоты по двум осям равны или очень близки ( $\omega_0 = v_0$ ).

Датчик угловой скорости ADXRS150EB работает в резонансном режиме. Кориолисова сила инерции по оси ОХ при этом уравновешивается силой демпфирования, поскольку инерционная сила в резонансном режиме компенсируется силой упругости. Тогда  $\lambda_x = \frac{1}{2\xi_x}, \chi_x = -\frac{\pi}{2}.$

Перемещение по оси съема при этом с точностью до знака определяется следующим выражением:

$$x = \frac{2m_q \Omega \dot{y}_0}{\xi_x C_x (m_p + m_q)} \cos(\omega t) = \frac{2m_q \Omega \dot{y}_0}{D_x v_0 (m_p + m_q)} \cos(\omega t).$$

## Конструкция датчика

Конструктивная схема датчика угловой скорости представлена на рис.2.

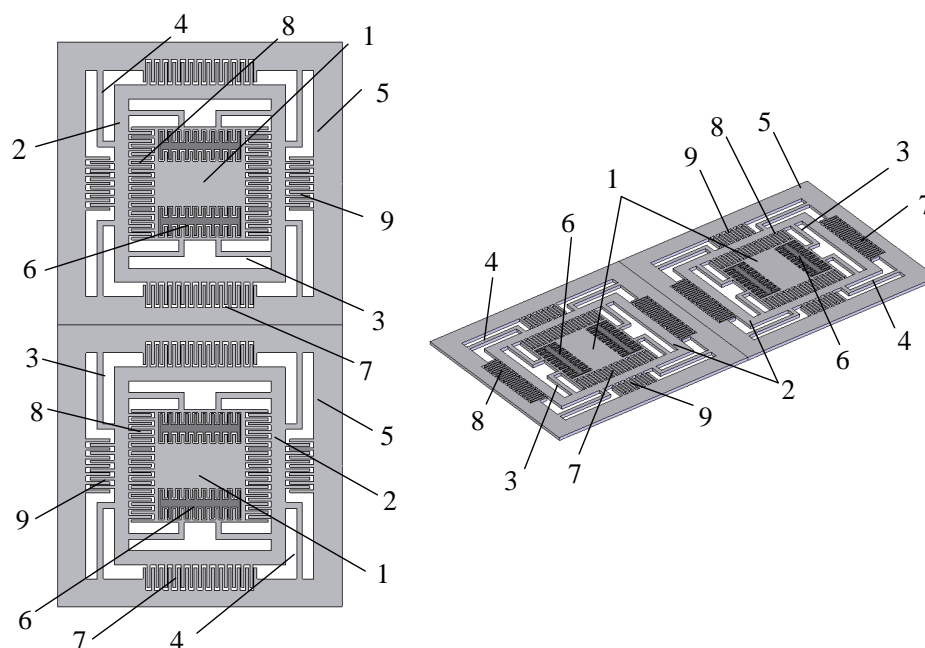


Рис. 2. Конструктивная схема микромеханического гироскопа L-L типа  
1 – чувствительный элемент, 2- рамка, 3 – внутренние торсионы,  
4 – наружные торсионы, 5 – основание, 6 – электростатический привод системы возбуждения, 7 – датчик перемещения по оси съема, 8 – датчик перемещений системы возбуждения, 9 – электростатический привод обратной связи по оси съема

Датчик ADXRS150 состоит из двух механически независимых гироскопов, объединенных в единую конструкцию. Каждый гироскоп представляет собой чувствительный элемент 1, подвешенный в основании 5 с помощью двухосного упругого подвеса.

Чувствительным элементам 1 гироскопов задаются поступательные колебательные движения в резонансном режиме, но в противофазе друг другу. Подобное использование двух гироскопов позволяет значительно снизить влияние движения основания с переменными величинами ускорений (удар, вибрация) на выходной сигнал датчика. Для этого в датчике реализовано дифференциальное измерение угловой скорости. При использовании двух чувствительных элементов, совершающих разнонаправленные колебания, выходной сигнал датчика определяется разностью показаний двух гироскопов. В силу разнонаправленности колебаний полезные сигналы



двух чувствительных элементов складываются, а сигналы, вызванные ускоренным движением основания, вычитаются.

Возбуждение первичных колебаний чувствительных элементов осуществляется с помощью электростатического привода 6, выполненного в виде гребенки (в английском варианте - finger drive). Такая форма электростатического привода вызвана необходимостью увеличения электростатической силы за счет увеличения площади обкладок привода.

Первичные колебания чувствительного элемента создаются специальной системой возбуждения, которая обеспечивает работу чувствительного элемента по оси возбуждения в режиме автоколебаний. Для этого в качестве измерительного устройства по оси возбуждения используется емкостной датчик перемещения 8, который так же, как и электростатический привод имеет гребенчатую структуру, которая предназначена для повышения чувствительности датчика перемещения за счет увеличения площади обкладок.

Перемещение маятника вдоль оси съема, пропорциональное измеряемой абсолютной угловой скорости  $\Omega$  основания, измеряется также гребенчатыми датчиками емкостного типа 7. Для формирования цепи обратной связи по оси съема с целью компенсации влияния колебаний по оси возбуждения на выходной сигнал датчика используется датчик силы 9.

Фотографии ДУС ADXRS150 представлена на рис. 3, 4.

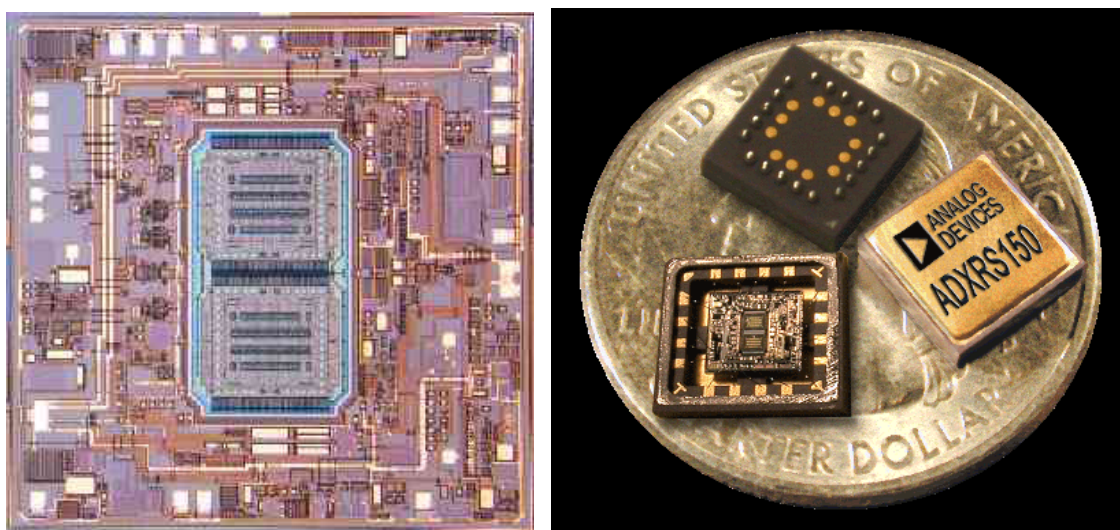


Рис.3. Внешний вид ADXRS150

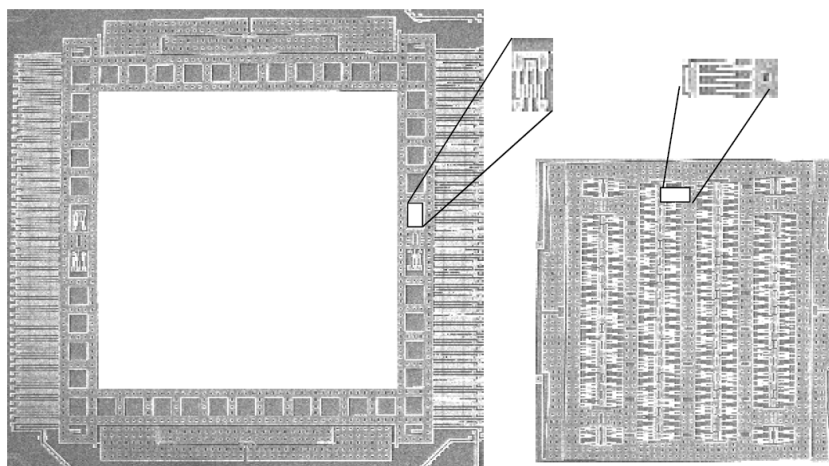


Рис.4. Чувствительный элемент ADXRS150

### Основные технические характеристики гироскопа ADXRS150EB:

- диапазон измерения	- 150 °/с;
- питание	- 5 В;
- крутизна выходной характеристики	- 12,5 мВ/°/с;
- нелинейность	- 0,1% от диапазона;
- полоса пропускания	- 40 Гц;
- резонансная частота	- 14 кГц;
- зависимость от напряжения	- 0,7%/В;
- габариты	- 7x7x3 мм.

### Описание лабораторной установки

Для определения основных характеристик микромеханический ДУС установлен в кронштейне на малогабаритной поворотной установке МПУ-1 таким образом, что его измерительная ось совпадает с осью вращения стола МПУ-1.

Подвод питания к ДУС и съем показаний с него осуществляется с помощью пульта.

Исходные положения выключателей и переключателей на пульте перед проведением работы:

- В1 “Чередование фаз” – “Откл”,
- В3 ”Питание гиromоторов” – “Откл”,
- В4 “Питание ДУ” – “Откл”,
- В5 “Питание дискриминаторов” – “откл”,
- В7 “Дискриминатор” – “Откл”,
- В8 “Нагрузка” – “Вкл”,
- В9 “Питание ДМ” – “Откл”,
- В2 “Контроль питания ГМ” – в положении “2”.

Подключение пульта и установки МПУ-1 к источникам питания осуществляется преподавателем. Против отсчетного индекса установки МПУ-1 должно быть выставлено значение угловой скорости – “0”.

### **Порядок проведения лабораторной работы**

1. Выключатель выбора тестируемого прибора на пульте установить в положение ”ММГ”.

2. Установить выключатель питания микромеханического гироскопа в положение “Вкл”.

3. Снять выходную характеристику датчика.

Для этого включить вращение поворотного стола по часовой стрелке. Последовательно меняя скорость вращения от 0 до 150 %/с, провести измерения выходного сигнала датчика и записать показания в таблицу 1. Повторить измерения для вращения стола против часовой стрелки. Результаты занести в таблицу.

4. По результатам измерения из таблицы 1 построить график  $U = f(\Omega)$ . Определить крутизну характеристики  $k = \frac{U}{\Omega}$ .

5. На вращающемся основании при отклонении центра масс чувствительного элемента гироскопа от центра подвеса вдоль осей возбуждения и съема помимо кориолисова возникает и центростремительное ускорение. Оценить влияние центростремительного ускорения на показания датчика.

6. Составить отчет, который должен содержать описание принципа действия и конструкции микромеханического вибрационного ДУС, кинематическую схему прибора, результаты эксперимента, занесенные в таблицу 1, и график.

Таблица 1.

$\Omega$ °/с	1	2	5	10	20	50	75	100	120	150
U, мВ										

### Контрольные вопросы

1. С какой целью в ДУС ADXRS150 объединены два гироскопа?
2. Объясните принцип действия ДУС.
3. Каков принцип съема выходного сигнала в ДУС ADXRS150?
4. Почему данный прибор относится к микромеханическим приборам L-L типа?

### Список рекомендуемой литературы

1. В.Я.Распопов. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007. - 400с.
2. S.Beeby, G.Ensell, M.Kraft, N.White. MEMS Mechanical Sensors. Artech House, Inc. Boston, London. 2004. – 281 с.
3. M.Kranz, G.Fedder. Design, Simulation, and Implementation of Two Novel Micromechanical Vibratory-Rate Gyroscopes. - Department of Electrical and Computer Engineering at Carnegie Mellon University, 1998. – 41 с.