

КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Гироскопы

Гироско́п (от др.-[греч.](#) γῦρος — *круг* + σκοπέω — *смотрю*) — устройство, способное реагировать на изменение [углов ориентации](#) тела, на котором оно установлено, относительно [инерциальной системы отсчета](#). Простейший пример гироскопа — [юла \(волчок\)](#).

Термин впервые введен [Ж. Фуко](#) в его докладе в [1852 году](#) во [Французской Академии Наук](#). Доклад был посвящён способам экспериментального обнаружения [вращения Земли](#) в [инерциальном пространстве](#). Этим и обусловлено название «гироскоп».



Основные определения

Микромеханические, или **микрогироскопы (МГ)**, являются электромеханическими системами, в которых энергия вынужденных (первичных) колебаний **инерционной массы (ИМ)** на упругом подвесе (резонатор) при появлении переносной угловой скорости преобразуется в энергию вторичных колебаний, которые содержат информацию об измеряемой угловой скорости.

Преобразование осуществляется вследствие воздействия на резонатор сил (или моментов) инерции Кориолиса при вращении резонатора с переносной угловой скоростью, вектор которой перпендикулярен к вектору количества движения, или момента количества движения (кинетического момента), соответственно для поступательных или вращательных первичных колебаний ИМ.

Первичные колебания называют также **режимом движения (РД)**, или движением по координате возбуждения, а вторичные – **режимом чувствительности (РЧ)**, или движением по координате выходного сигнала.

Основные определения

Классификационные признаки микрогироскопов

По виду движения ИМ в РД и РЧ различают гироскопы LL-типа (linear-linear), или LL-гироскопы; гироскопы RR-типа (rotare-rotare), или RR-гироскопы, и гироскопы LR-типа, или LR-гироскопы. В LL-гироскопах ИМ в РД и РЧ совершают поступательные перемещения, в RR-гироскопах – вращательные перемещения, в LR (RL)-гироскопах – различные комбинации поступательных и вращательных перемещений ИМ.

1. Число измерительных осей
2. Число инерционных масс
3. Тип подвеса
4. Наличие кинематических связей
5. Вид перемещения ИМ
6. Тип привода (обратные преобразователи)
7. Тип датчика съема сигнала (обратные преобразователи).

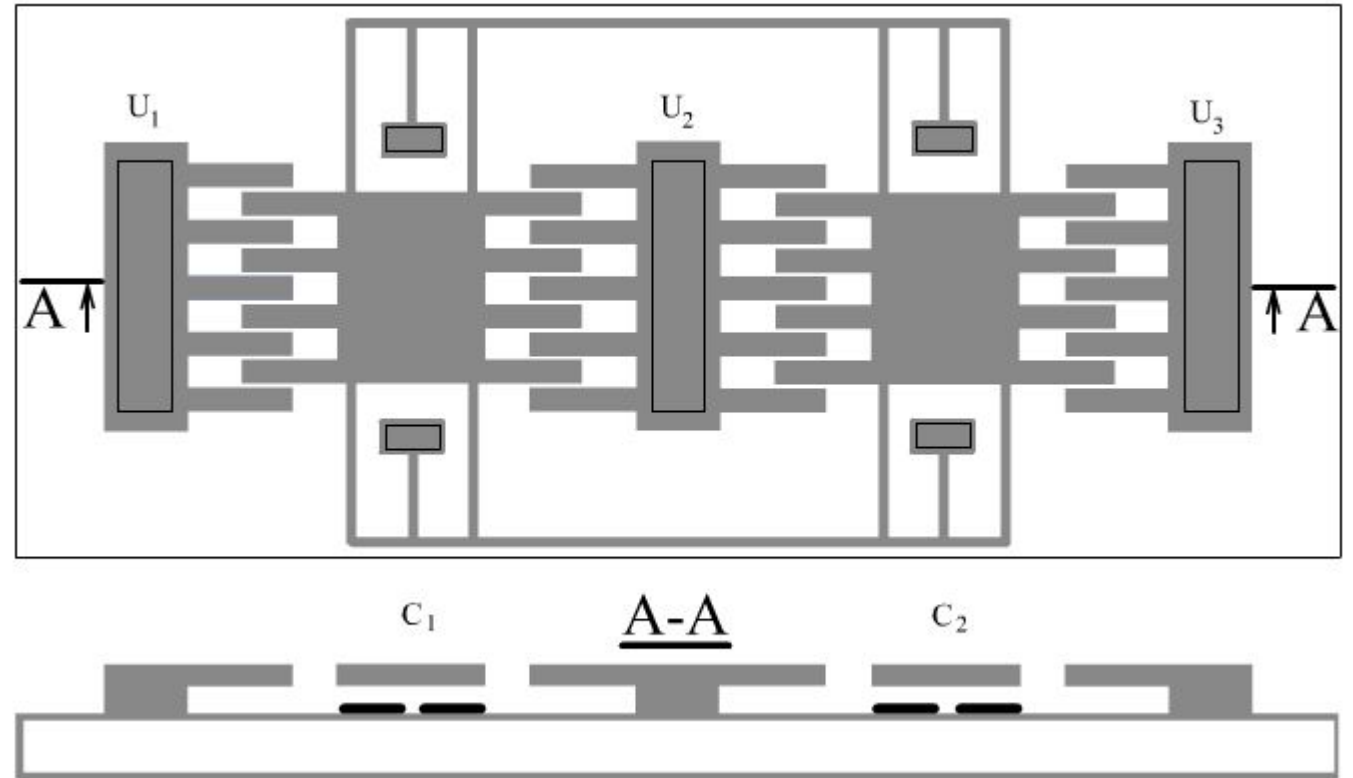
Основные определения

МГ представляют собой объемные многослойные микроструктуры, изготовленные из кристаллического материала, рабочие процессы в которых поддерживаются электроникой, выполненной по планарной технологии на одном (или нескольких) из слоев микроструктуры. Возможно изготовление МГ и по гибридной технологии – резонатор изготавливается по технологии МЭМС, а электроника – традиционно на отдельных платах.

МГ могут работать в режимах прямого и компенсационного преобразования (измерений).

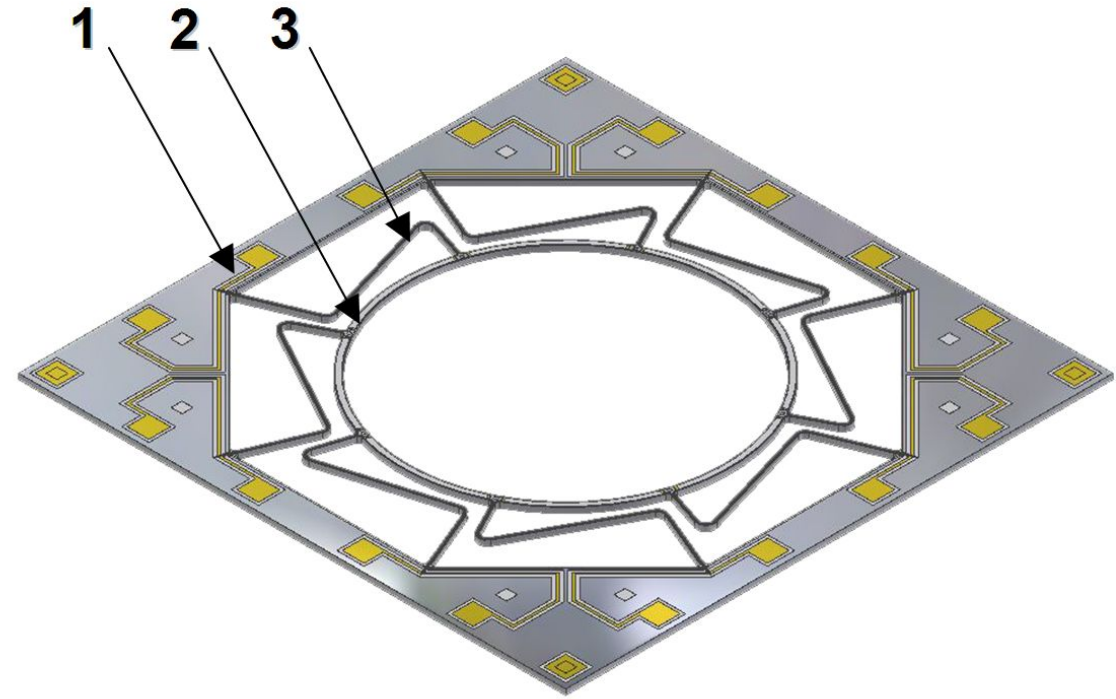
Основные определения МГ камертонные и волновые

Отличительным признаком камертонных МГ (КМГ) является наличие стержневых структур ("ножек"). Существенно и то, что ИМ ножек, как правило, равномерно распределена вдоль их длины и имеется свободный, незакрепленный конец. При появлении переносной угловой скорости, вектор которой перпендикулярен к векторам количества движения элементарных масс, распределенных вдоль ножек, возникают силы инерции Кориолиса, генерирующие вторичные колебания ножек КМГ.



Основные определения МГ камертонные и волновые

Отличительным признаком волновых МГ является наличие резонаторов, имеющих форму кольца, которое с помощью упругих элементов подвеса скреплено с корпусом, либо форму стержня, закрепление которого в корпусе не препятствует его продольным и поперечным колебаниям.



Основные определения

Типовые характеристиками МГ

1. Диапазон измерений
2. Чувствительность
3. Полоса пропускания частот
4. Масштабный коэффициент и его стабильность
5. Перекрестная чувствительность
6. Шум
7. Температурная стабильность характеристик
8. И другие эксплуатационные параметры и характеристики.

Микрогироскопы LL-типа

Одномассовые микрогироскопы

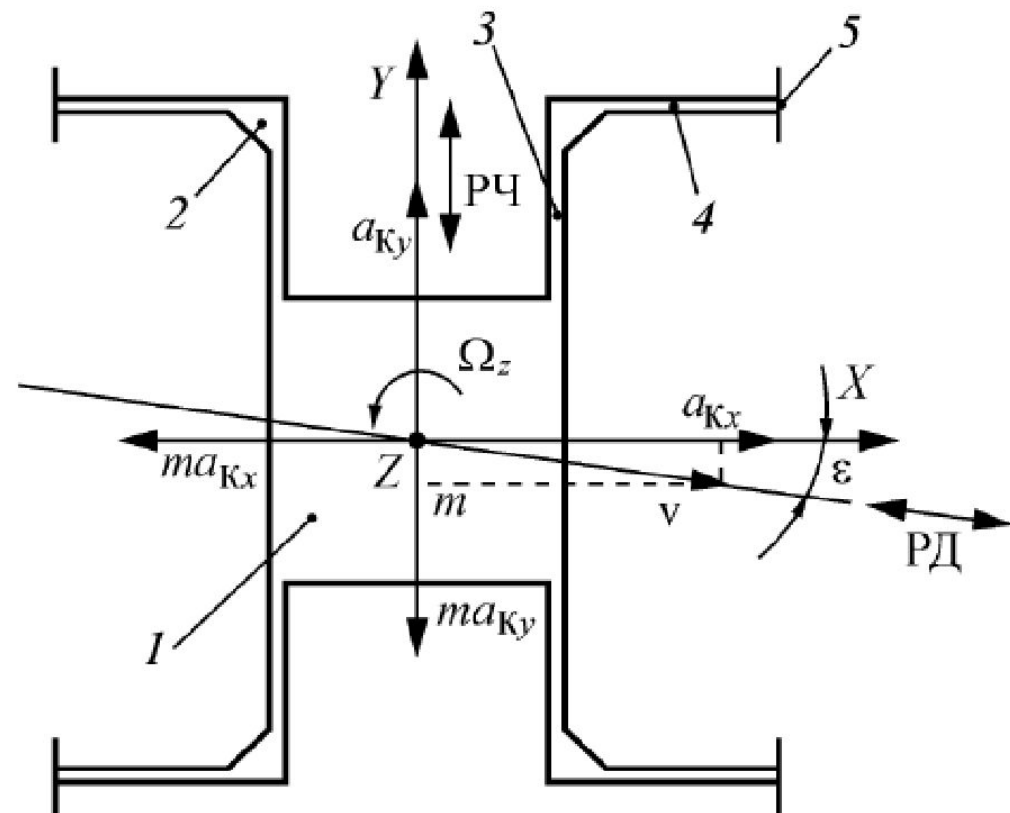


Рис. 1.34. Принципиальная схема одномассового ЧЭ МГ:
1 – ИМ; 2 – жесткий элемент; 3, 4 – упругие элементы подвеса;
5 – основание (показано условно)

В общем случае привод развивает силу $F_0 \sin pt$ (F_0, p – соответственно амплитуда силы и частота ее генерации), которая направлена под некоторым малым углом ε ($\sin \varepsilon \approx \varepsilon, \cos \varepsilon \approx 1, t$ – время) к оси x и сообщает ИМ колебания $x = x_0 \sin pt$ (x_0 – амплитуда колебаний). Мгновенный вектор линейной скорости ИМ в РД имеет проекции на оси X и Y :

$$v_x = v \cos \varepsilon \approx v; \quad v_y = -v \sin \varepsilon \approx -v\varepsilon.$$

При появлении переносной угловой скорости Ω_z , мгновенный вектор которой направлен в положительном направлении оси z , возникает ускорение Кориолиса вдоль осей X и Y :

$$a_{Kx} = 2\Omega_z v \varepsilon, \quad a_{Ky} = 2\Omega_z v,$$

вследствие чего ИМ оказывается под действием сил инерции Кориолиса: ma_{Kx} вдоль оси X , и ma_{Ky} вдоль оси Y .

Микрогироскопы LL-типа

Одномассовые микрогироскопы

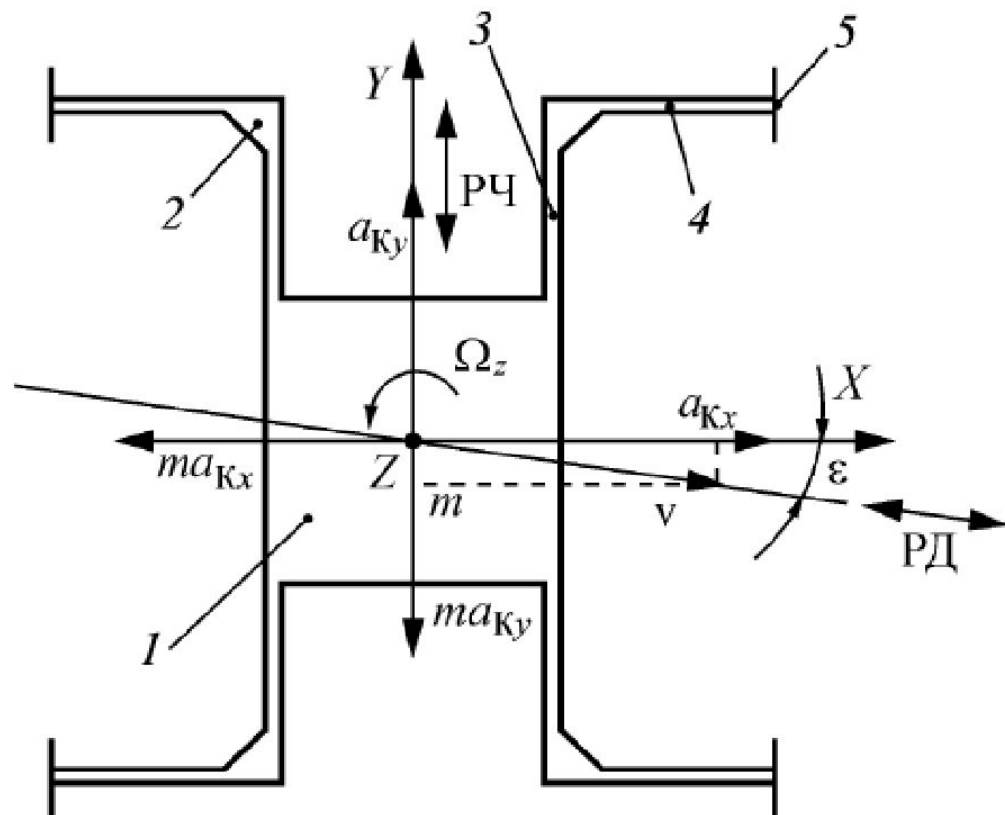


Рис. 1.34. Принципиальная схема одномассового ЧЭ МГ:
 1 – ИМ; 2 – жесткий элемент; 3, 4 – упругие элементы подвеса;
 5 – основание (показано условно)

С учетом сил инерции, демпфирования и упругих сил, действующих на ИМ, уравнения ее движения в простейшем случае имеют вид

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} + b_x\dot{x} + G_x x &= F_0 \sin pt - 2mv\Omega_z \varepsilon; \\ m\ddot{y} + b_y\dot{y} + G_y y &= -(F_0 \sin pt)\varepsilon - 2mv\Omega_z, \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

где b_x, b_y – коэффициенты демпфирования ИМ в направлении соответствующих осей; G_x, G_y – жесткости упругого подвеса в направлении соответствующих осей.

Первое уравнение системы (1.11) описывает РД, а второе – РЧ, из которого следует, что перемещение ИМ вдоль оси Y под действием силы инерции Кориолиса искажается проекцией силы привода на эту же ось, что приводит к ошибке в МГ измерении.

Микрогироскопы LL-типа

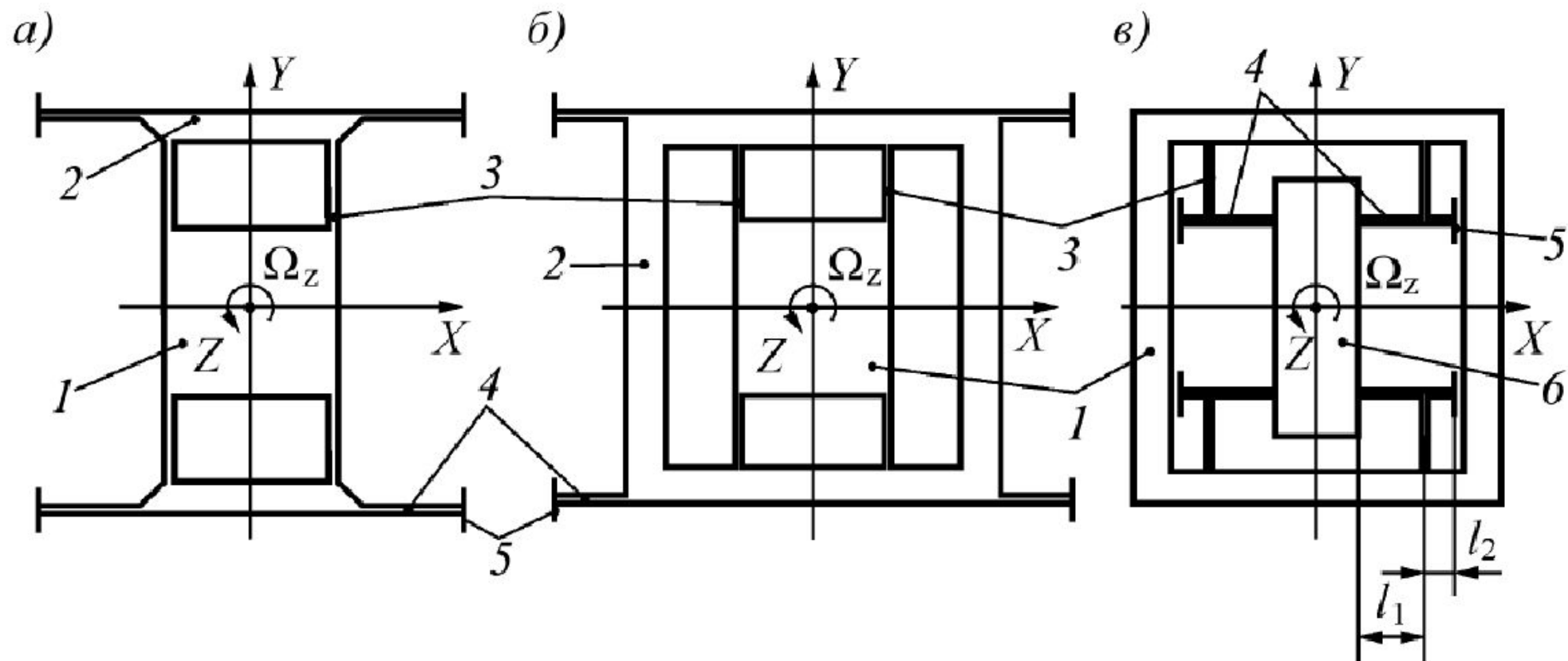


Рис. 1.35. Принципиальные схемы одномассовых ЧЭ МГ:

a – ЧЭ со спаренными упругими элементами внешнего подвеса; *б* – ЧЭ с разделенными упругими элементами внешнего подвеса и промежуточной рамкой; *в* – ЧЭ с сопряженными упругими элементами внутреннего подвеса с функцией механического усиления выходного сигнала; 1 – ИМ; 2 – жесткие элементы подвеса; 3, 4 – упругие элементы подвеса; 5 – основание; 6 – кинематический элемент

Микрогироскопы LL-типа

Если РД организован вдоль оси X , то ось Y является осью РЧ и простейшие уравнения движения имеют вид

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x} + b_x \dot{x} + G_x x &= F_0 \sin pt; \\ (m_1 + m_2) \ddot{y} + b_y \dot{y} + G_y y &= -2m_1 \Omega_z v, \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

где m_1 – масса ИМ 1; m_2 – суммарная масса элементов 2 по схеме 1.35, а или масса рамки 2 по схеме 1.35, б; b_x – коэффициент демпфирования ИМ 1 вдоль оси X ; b_y – то же, всей структуры вдоль оси Y ; G_x – суммарная жесткость элементов 3 в направлении оси X ; G_y – то же, элементов 4 в направлении оси Y (остальные обозначения введены ранее).

Уравнения движения для случая РД, организованного вдоль оси Y и осью РЧ вдоль оси X , имеют вид

$$\left. \begin{aligned} (m_1 + m_2) \ddot{y} + b_y \dot{y} + G_y y &= F_0 \sin pt; \\ m_1 \ddot{x} + b_x \dot{x} + G_x x &= -2m_1 \Omega_z v, \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

где обозначения соответствуют системе (1.12).

Для трех схем ЧЭ (рис. 1.34; 1.35, а, б) после завершения переходных процессов перемещения ИМ в РЧ описываются одинаковыми по структуре зависимостями, простейший вид которых, например из второго уравнения системы (1.11), имеет форму

$$y = -\frac{2mv\Omega_z}{G_y}. \quad (1.14)$$

Важнейшими параметрами МГ являются собственные частоты ИМ в РД и РЧ, их стабильность, а также возможность частотной настройки между режимами. В простейшем случае собственные частоты колебаний ИМ, соответствующие, например, системе (1.12), рассчитываются по формулам

$$\omega_{x0} = \sqrt{G_x / m_1} ; \omega_{y0} = \sqrt{G_y / (m_1 + m_2)}, \quad (1.15)$$

из которых видна, в частности, зависимость собственных частот колебаний от конструктивных особенностей ЧЭ.

Микрогироскопы LL-типа

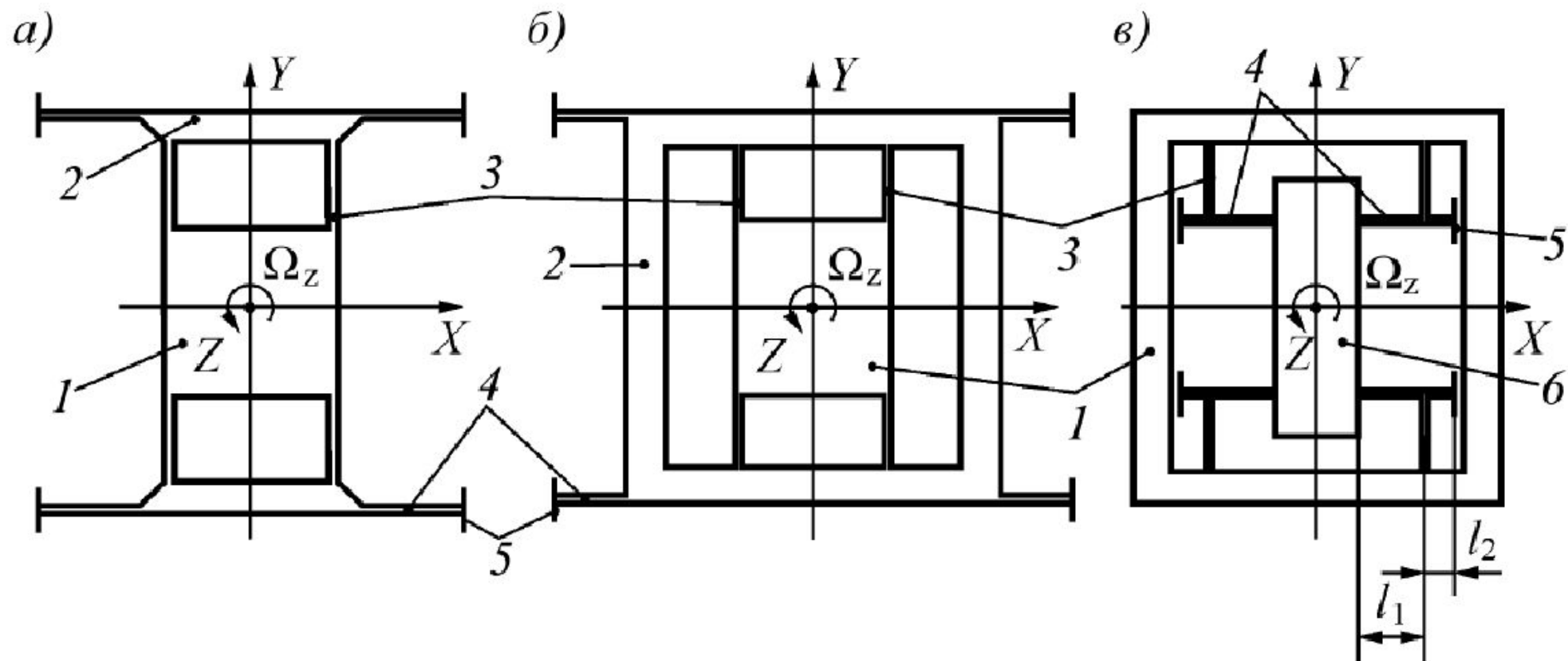


Рис. 1.35. Принципиальные схемы одномассовых ЧЭ МГ:

a – ЧЭ со спаренными упругими элементами внешнего подвеса; *б* – ЧЭ с разделенными упругими элементами внешнего подвеса и промежуточной рамкой; *в* – ЧЭ с сопряженными упругими элементами внутреннего подвеса с функцией механического усиления выходного сигнала; 1 – ИМ; 2 – жесткие элементы подвеса; 3, 4 – упругие элементы подвеса; 5 – основание; 6 – кинематический элемент

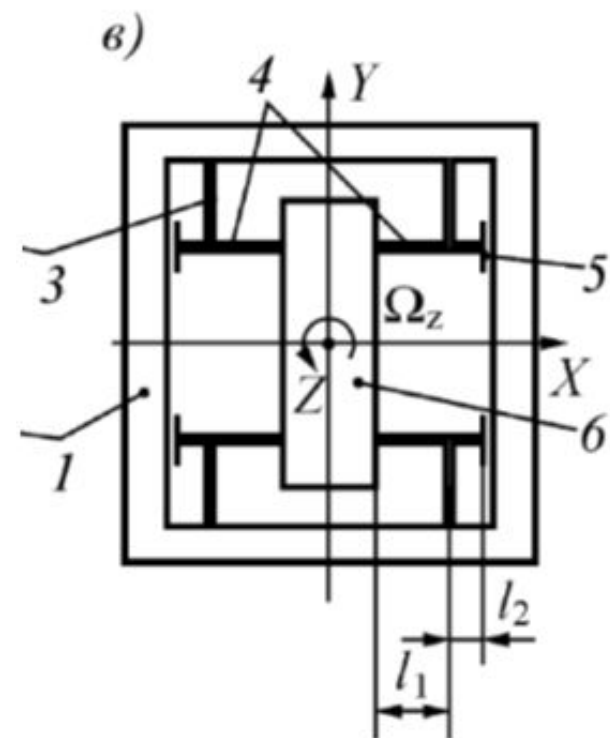
РД выполняется вдоль оси X , и перемещения ИМ 1 обеспечиваются упругими элементами 3 . Элемент 6 при этом остается неподвижным. При появлении угловой скорости Ω_z силы инерции Кориолиса вызывают перемещение ИМ 1 вдоль оси Y на величину y_1 . Эти силы преодолевают силы упругости элементов 4 , обусловленные их жесткостью и длиной элемента l_2 , а также инерционные и силы демпфирования. Элемент 6 при этом перемещается на величину

$$y_2 = y_1(1 + l_1/l_2), \quad (1.16)$$

пропорционально которой может быть сформирован выходной сигнал МГ.

Упрощенные уравнения движения ИМ имеют вид

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x} + b_x \dot{x} + G_x x &= F_0 \sin pt; \\ [m_1 + m_2(1 + l_1/l_2)] \ddot{y}_1 + [b_{y1} + b_{y2}(1 + l_1/l_2)] \dot{y}_1 + G_y y_1 &= -2m_1 v \Omega_z, \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$



где m_1, m_2 – массы элементов 1 и 6 соответственно; b_x – коэффициент демпфирования ИМ 1 в направлении оси X ; G_x – суммарная жесткость элементов подвеса в направлении оси X ; b_{y1}, b_{y2} – коэффициенты демпфирования элементов 1 и 6 в направлении оси Y ; G_y – суммарная жесткость элементов подвеса в направлении оси Y .

Для установившегося режима колебаний в соответствии с выражениями (1.16) и (1.17) имеем перемещения кинематического элемента по выходной оси:

$$y_2 = -\frac{2m_1 v \Omega_z}{G_y} (1 + l_1 / l_2). \quad (1.18)$$

Отсюда следует принципиальная возможность увеличения выходного сигнала с помощью кинематической передачи, выполняющей функцию механического усилителя.

Рассмотрим некоторые конструкции МГ, ЧЭ которых выполнены по рис. 1.34 и 1.35.

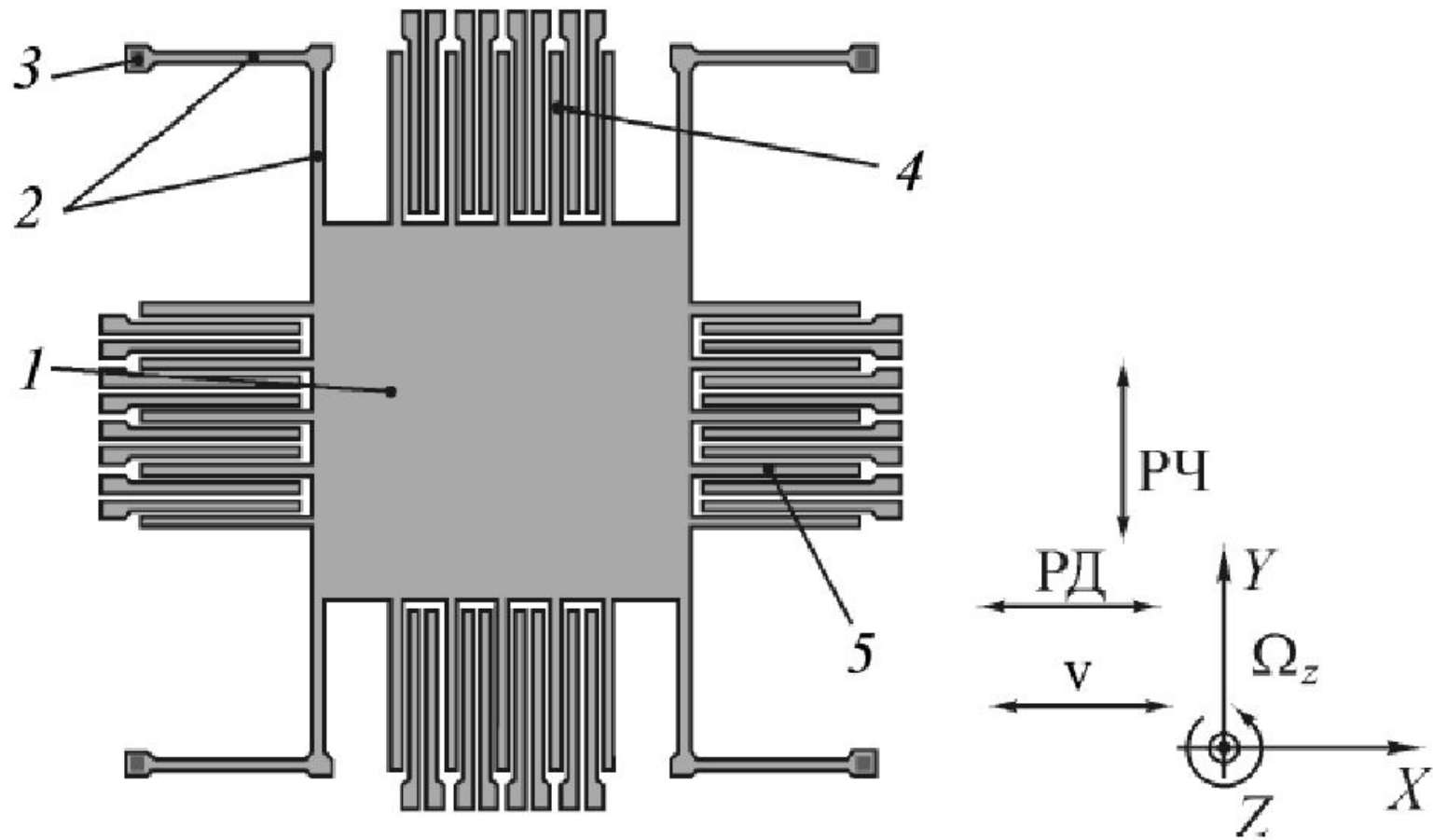


Рис. 1.36. Принципиальная схема МГ фирмы Nippondenso Co.:
 1 – ИМ; 2 – упругие элементы подвеса; 3 – анкер; 4 – гребенчатая структура электростатического привода; 5 – то же, электродов измерителей перемещений

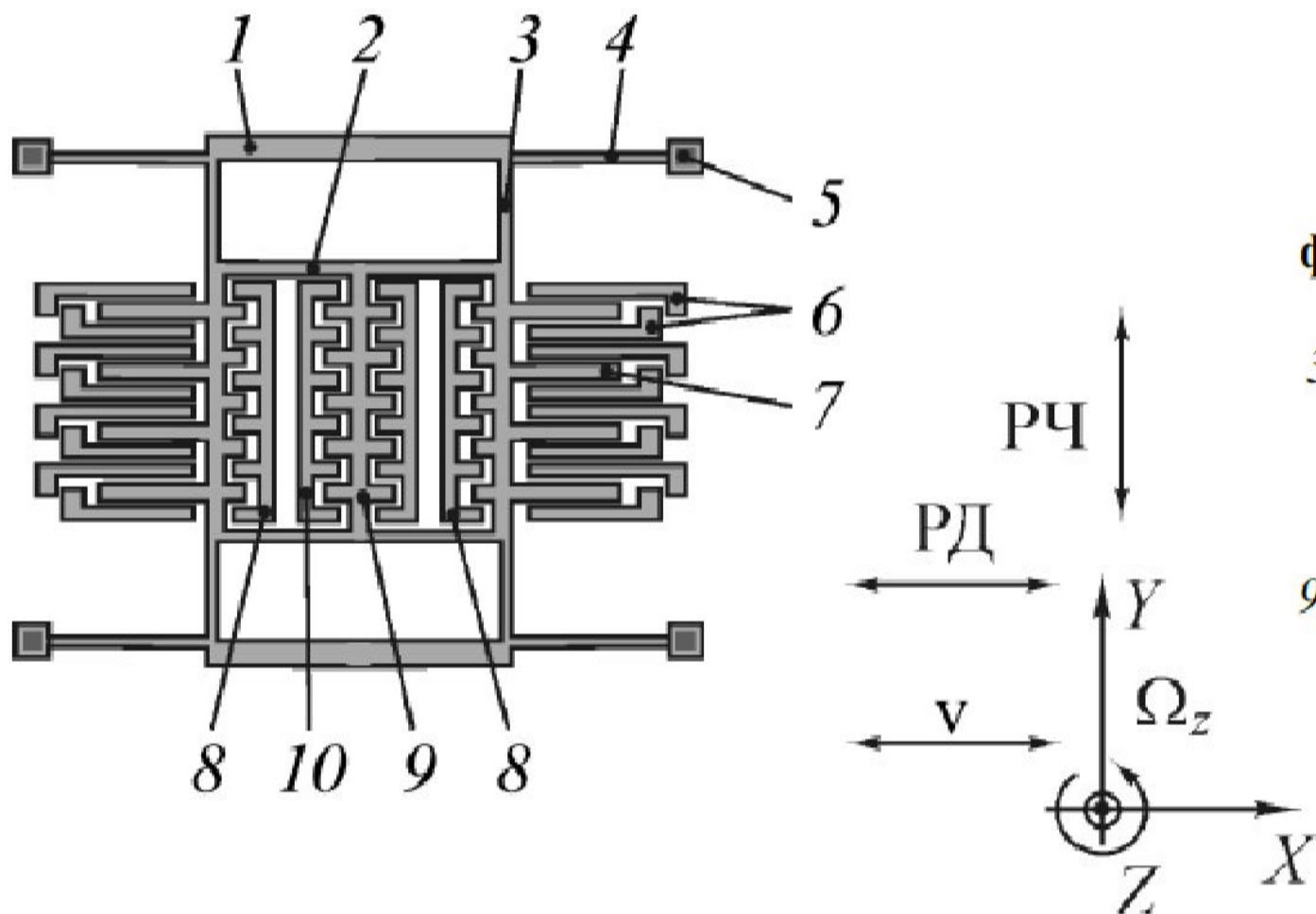
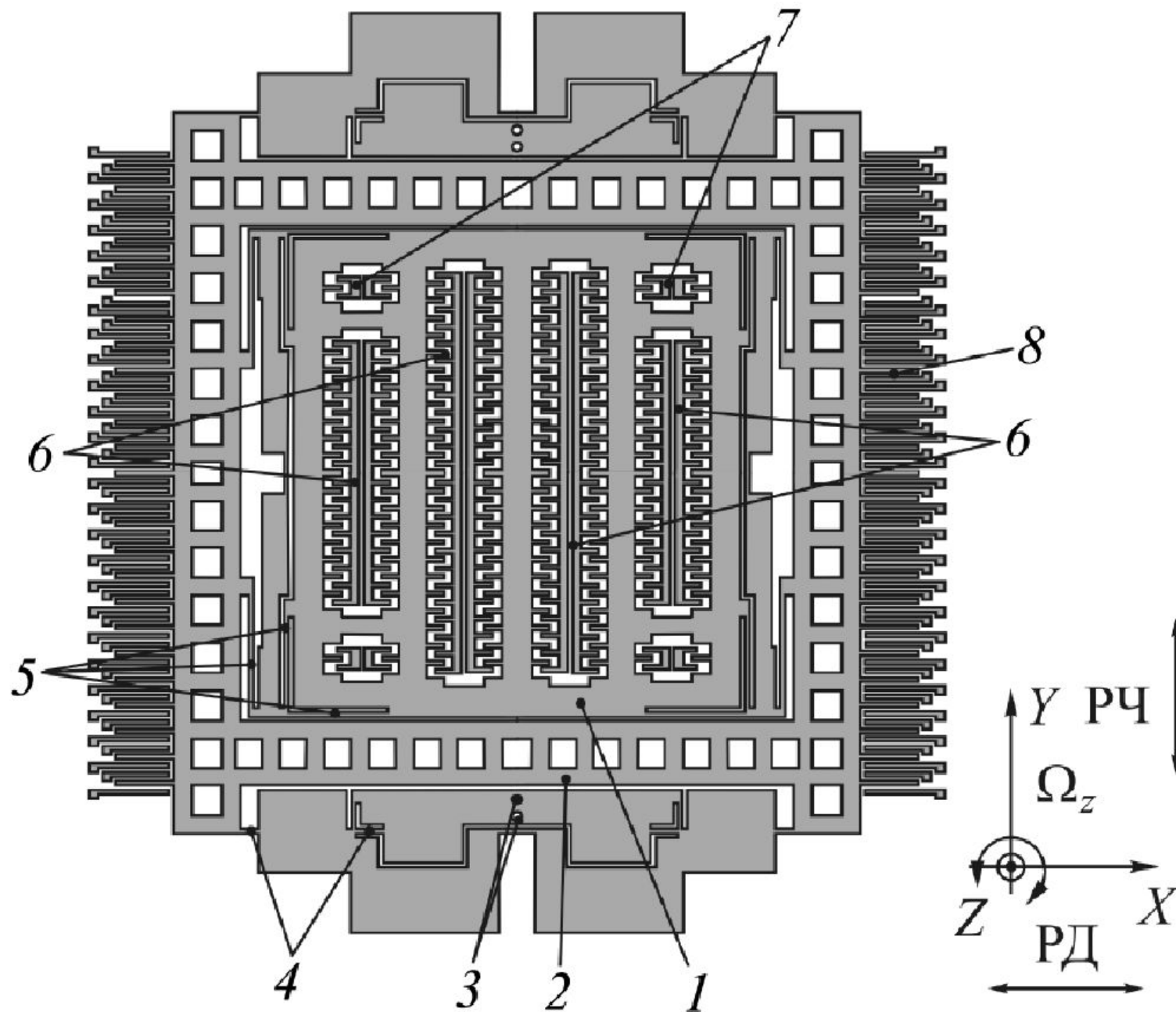


Рис. 1.37. Принципиальная схема МГ фирмы The Charles Stark Draper Laboratory:

1 – жесткий элемент подвеса; *2* – ИМ;
3 и *4* – упругие элементы подвеса; *5* – анкер;
6 и *7* – электроды емкостного измерителя перемещений в РЧ; *8* – неподвижные электроды электростатических приводов;
9 и *10* – емкостные измерители перемещений в РД с гребенчатыми структурами



**Рис. 1.38. Принципиальная схема МГ
фирмы Analog Devices:**

1 – внутренняя рамка; *2* – наружная рамка;
3 – анкера; *4, 5* – упругие элементы подвеса;
6 – гребенчатые структуры электростатического привода; *7, 8* – емкостные измерители перемещений

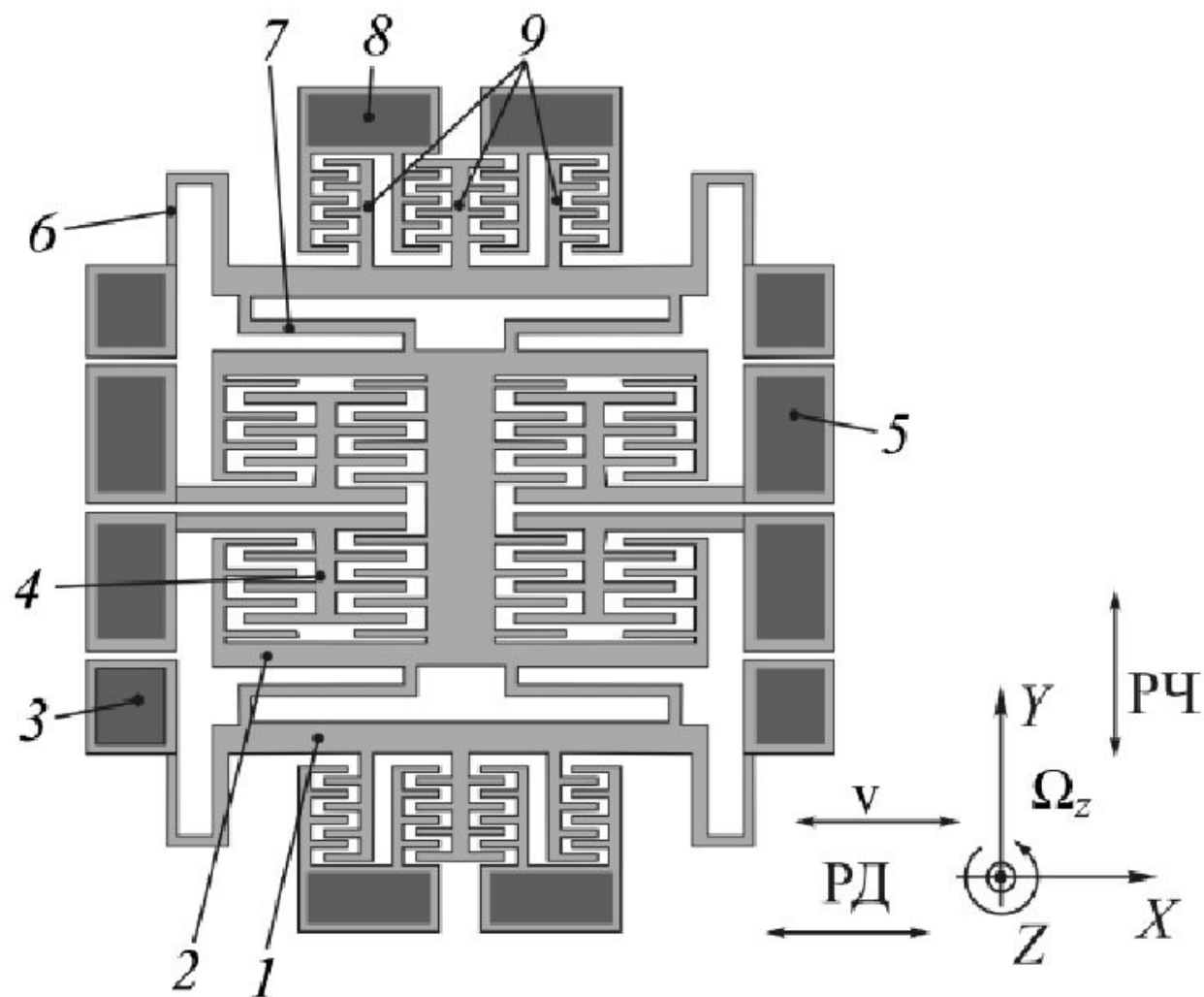


Рис. 1.39. Принципиальная схема МГ фирмы Samsung Electro. Mechanics:
 1, 2 – ИМ; 3, 5, 8 – анкерные элементы; 4 – гребенчатая структура емкостного измерителя;
 6, 7 – упругие элементы подвеса; 9 – гребенчатые структуры электростатического привода

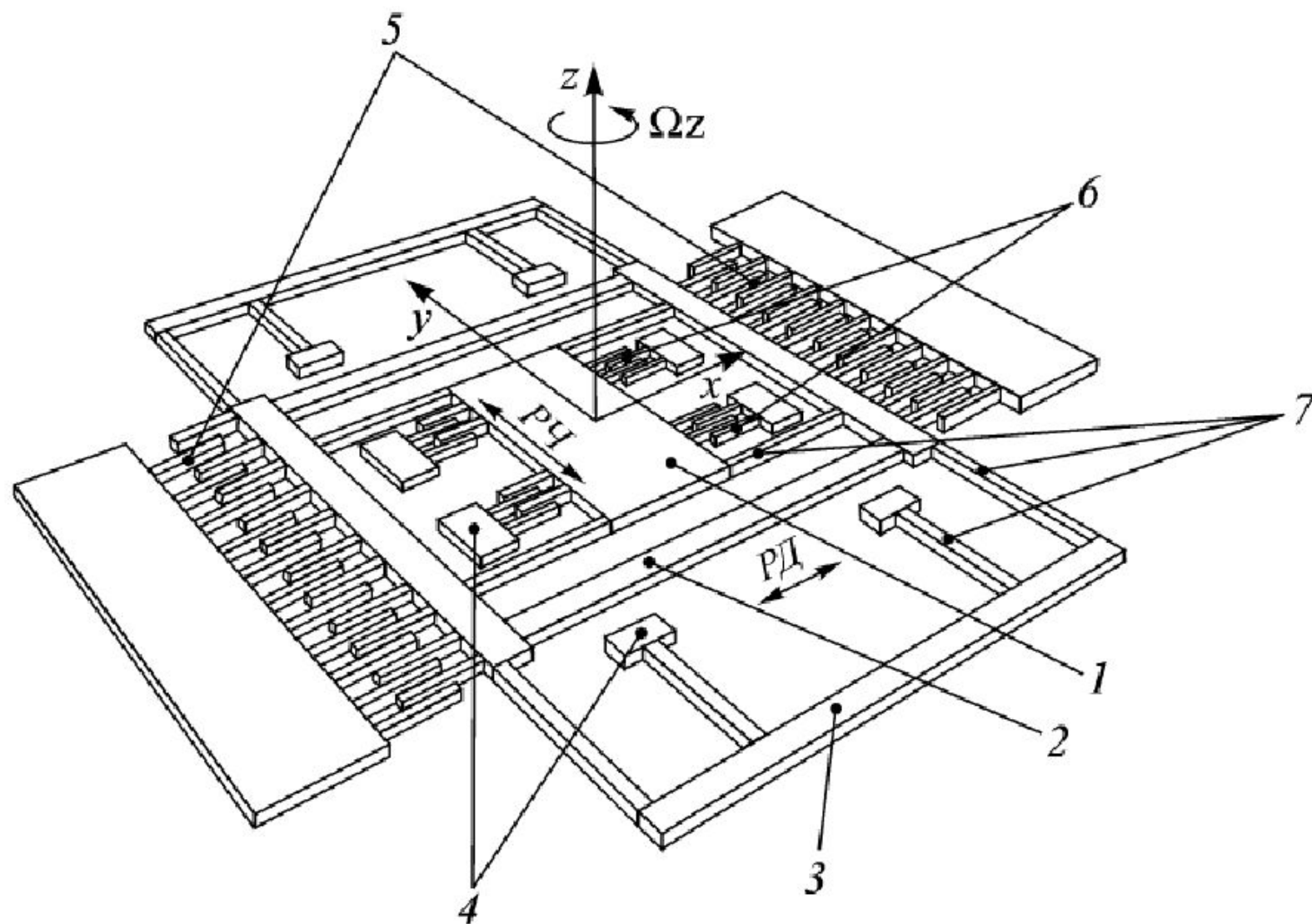


Рис. 1.40. Схема МГ MARS-LL:

1, 2 – ИМ; 3 – жесткий (недеформируемый) элемент подвеса; 4 – анкеры;
 5 – гребенчатые структуры электродов электростатических приводов; 6 – емкостные измерители
 перемещений; 7 – упругие элементы подвеса

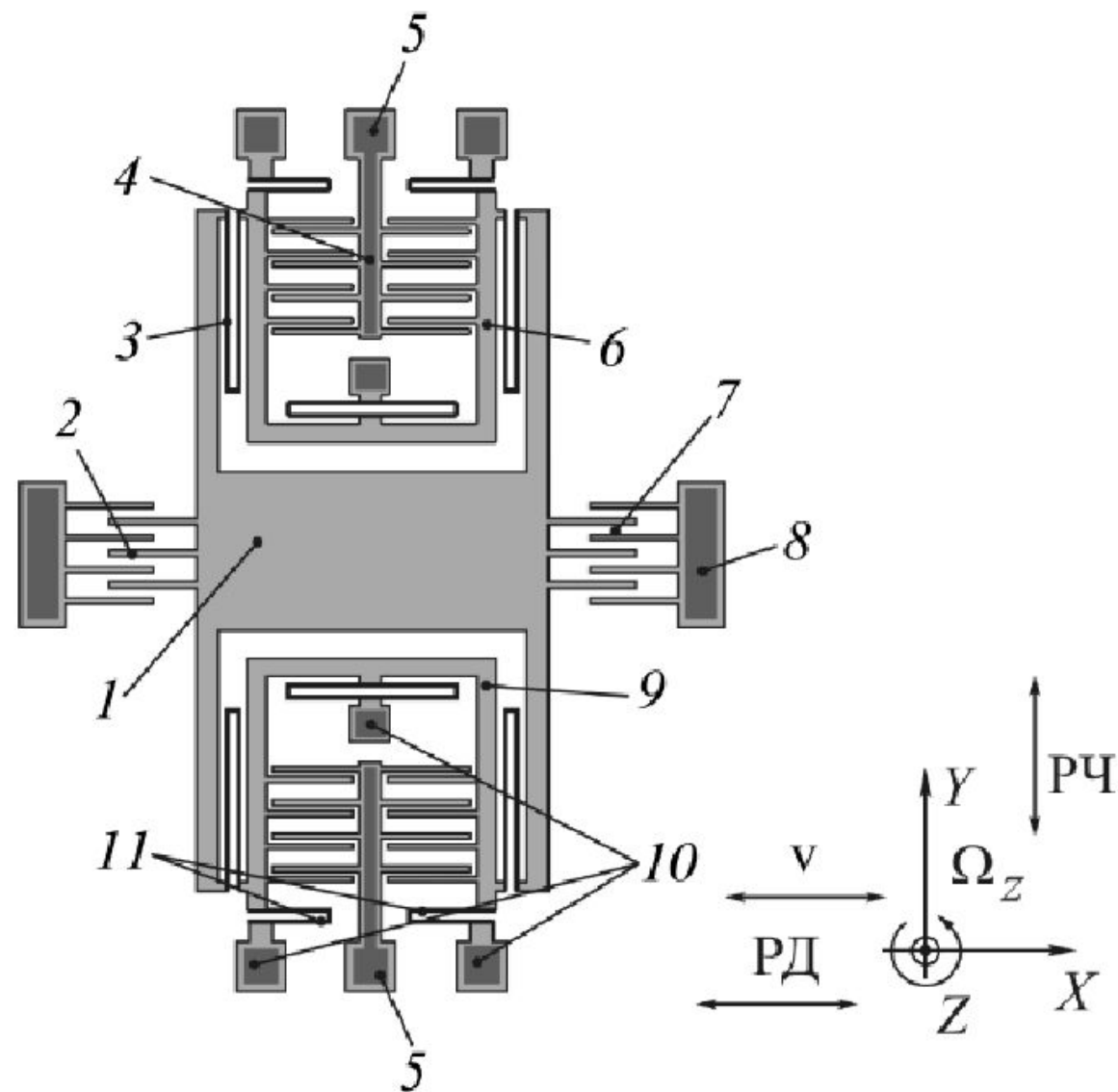


Рис. 1.41. Принципиальная схема МГ фирмы Bosch:

1 – ИМ; *2, 7* – гребенчатые структуры электродов; *3, 11* – упругие элементы подвеса; *4* – емкостный измеритель перемещений; *5, 8, 10* – анкеры; *6, 9* – опорные рамки

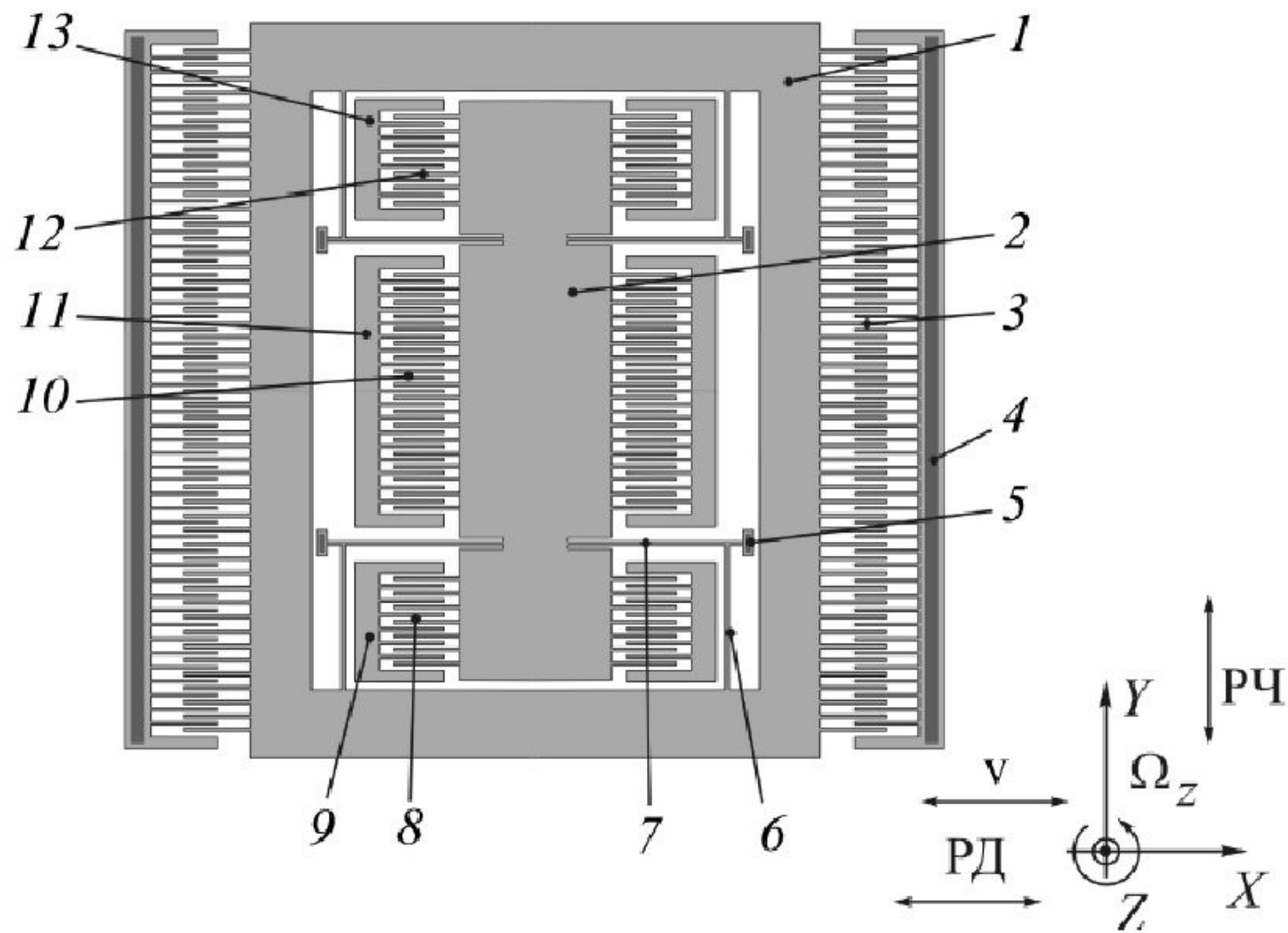


Рис. 1.42. Принципиальная схема МГ фирмы Microsensors:

1, 2 – ИМ; 3 – электростатический привод с гребенчатой структурой; 4, 5, 9, 11, 13 – анкеры; 6 и 7 – упругие элементы подвеса; 8 – привод контура компенсации; 10 – емкостные измерители перемещений с гребенчатой структурой; 12 – привод уравнивания и тестирования с гребенчатой структурой

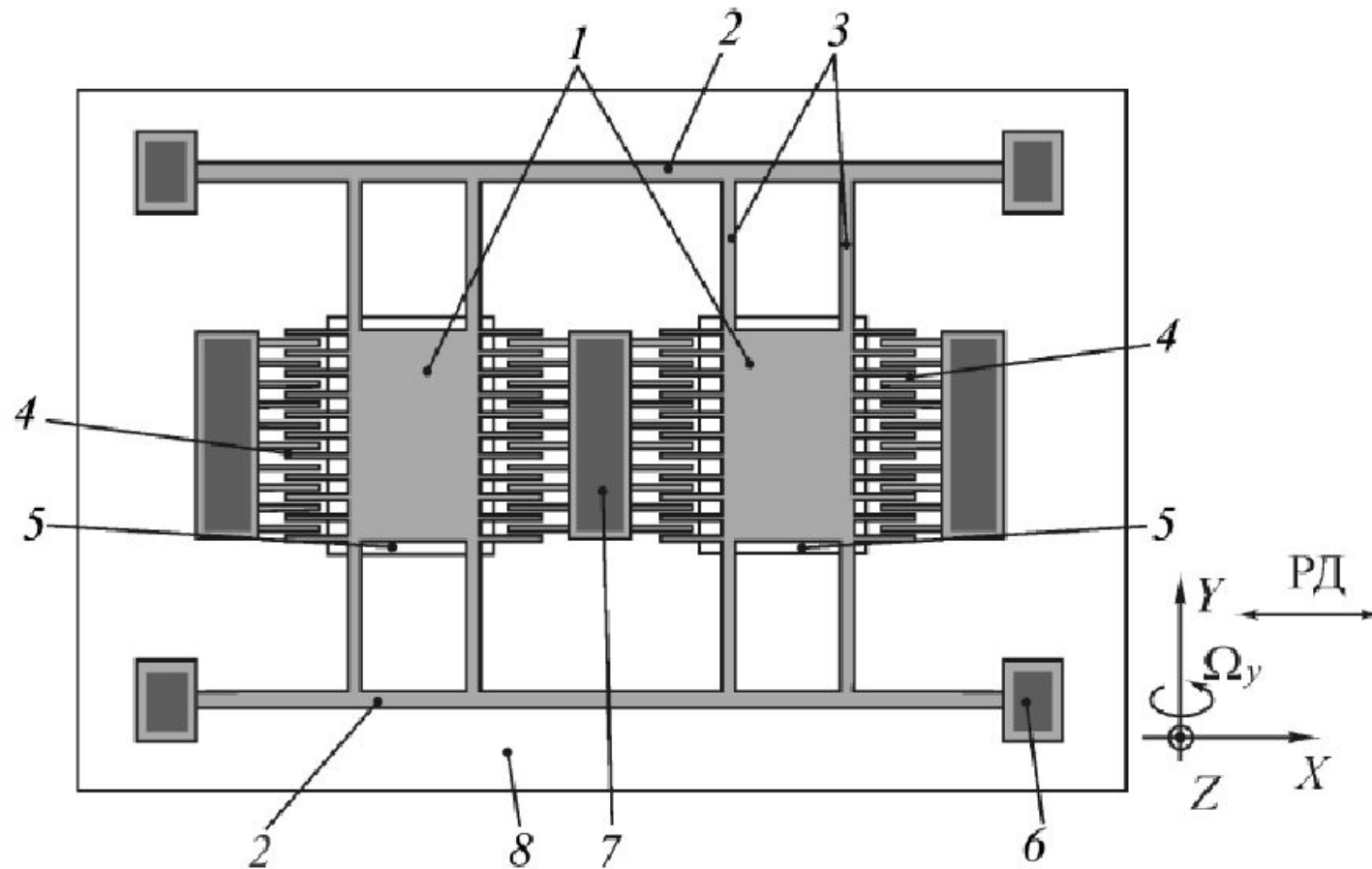
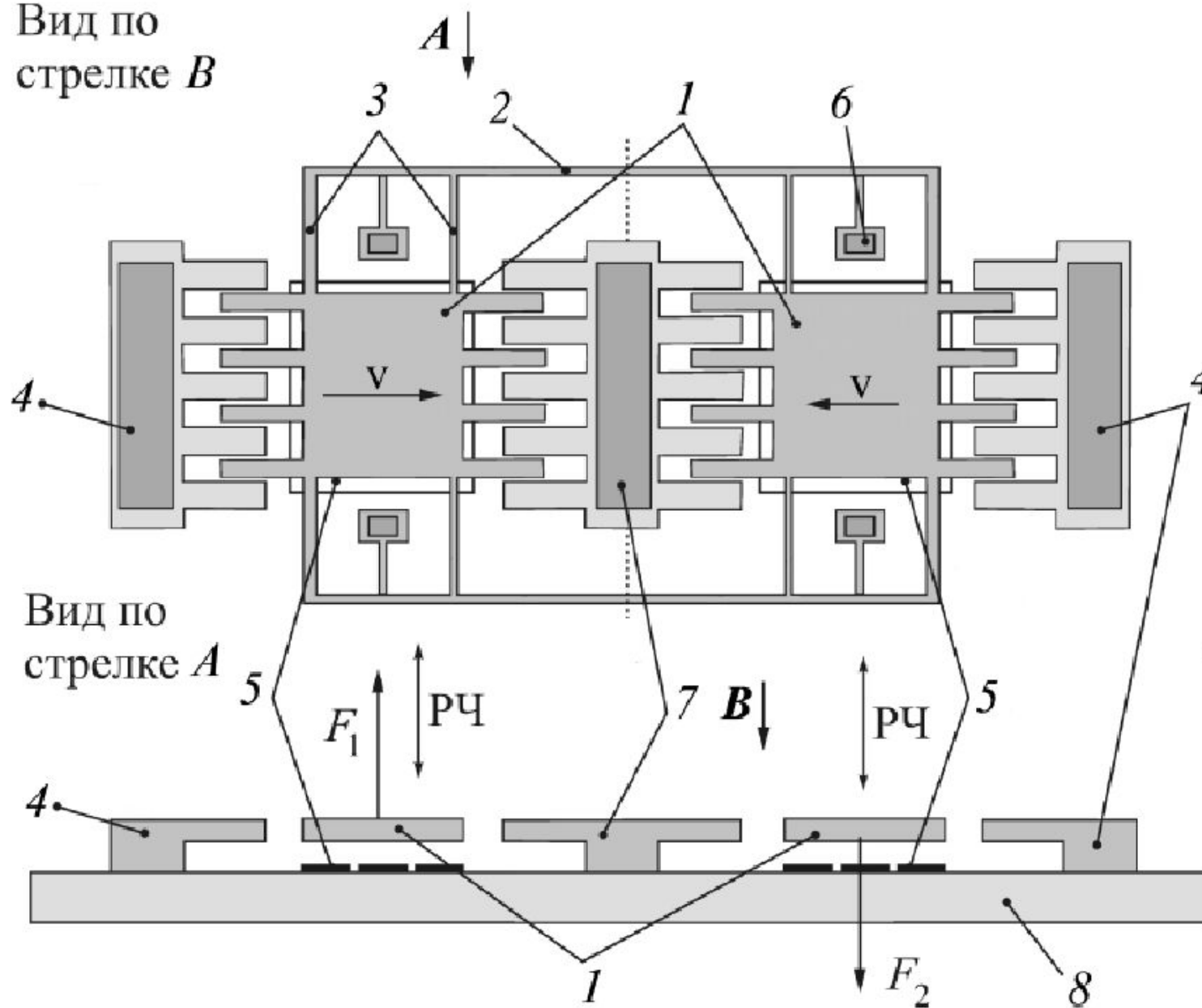


Рис. 1.43. Принципиальная схема МГ разработки фирмы The Charles Stark Draper Laboratory:

1 – ИМ; 2 – базовый элемент конструкции подвеса; 3 – упругие элементы подвеса;
 4, 7 – электростатические гребенчатые приводы; 5 – электроды измерителей перемещений;
 6 – анкер; 8 – подложка (основание)

Вид по
стрелке *B*



Вид по
стрелке *A*

В простейшем случае при условии равенства ИМ $m_1 = m_2 = m$, полной синхронности противофазных движений в РД и полной симметрии упругих свойств подвеса движение каждой ИМ может быть описано системой уравнений, идентичной системе (1.11):

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} + b_x\dot{x} + G_x x &= F_0 \sin pt; \\ m\ddot{z} + b_z\dot{z} + G_z z &= -2m v \Omega_y, \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$

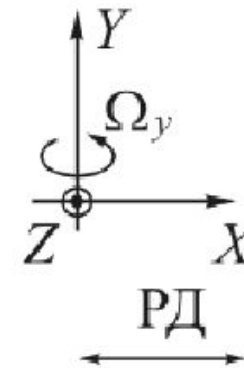


Рис. 1.44. Видоизмененная принципиальная схема МГ разработки The Charles Stark Draper Laboratory (обозначения см. на рис. 1.43)

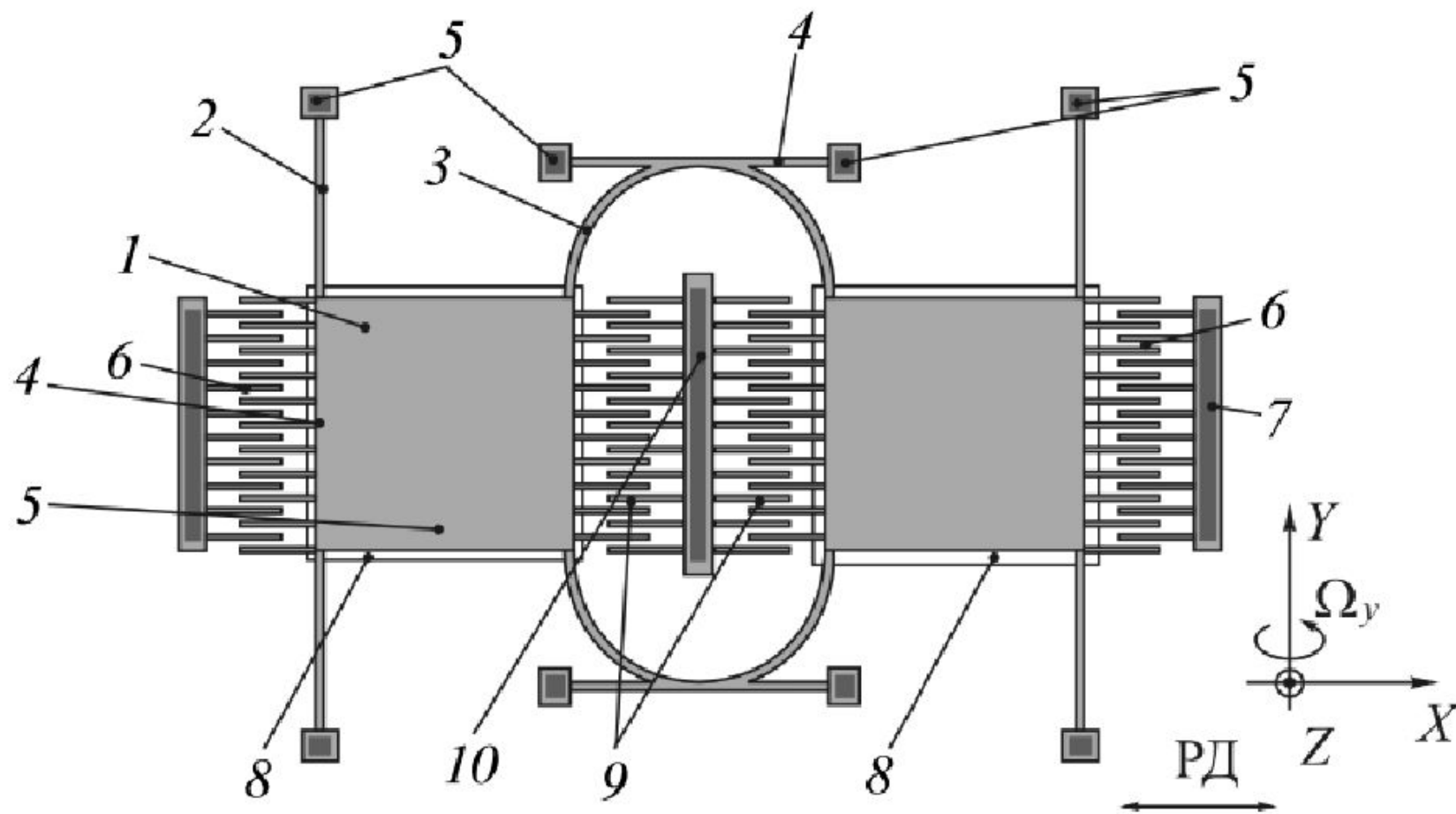


Рис. 1.45. Принципиальная схема МГ фирмы Analog Devices:

1 – ИМ; 2–4 – упругие элементы подвеса; 5, 7, 10 – анкеры; 6 – электростатические приводы с гребенчатыми структурами; 8 – неподвижные электроды емкостных измерителей перемещений в РЧ; 9 – емкостные измерители перемещений в РД с гребенчатыми структурами

Микрогироскопы LR-типа

В схеме ЧЭ на рис. 1.46, *а* перемещения ИМ в РД и РЧ происходят в одной плоскости, а в схеме на рис. 1.45, *б* – в разных.

рис. 1.46, *а*

В предположении, что все ИМ одинаковы, конструкция ЧЭ симметрична, упругие свойства всех элементов 2 и элементов 4 между собой идентичны, простейшая система уравнений, описывающая линейные перемещения одной ИМ в РД, например, по координате X и угловые колебания ЧЭ вокруг оси Z по координате φ в РЧ, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} + b_x\dot{x} + G_x x &= F_0 \sin pt; \\ J_\varphi \ddot{\varphi} + b_\varphi \dot{\varphi} + G_\varphi \varphi &= -8m v \Omega_z R_0, \end{aligned} \right\} (1.20)$$

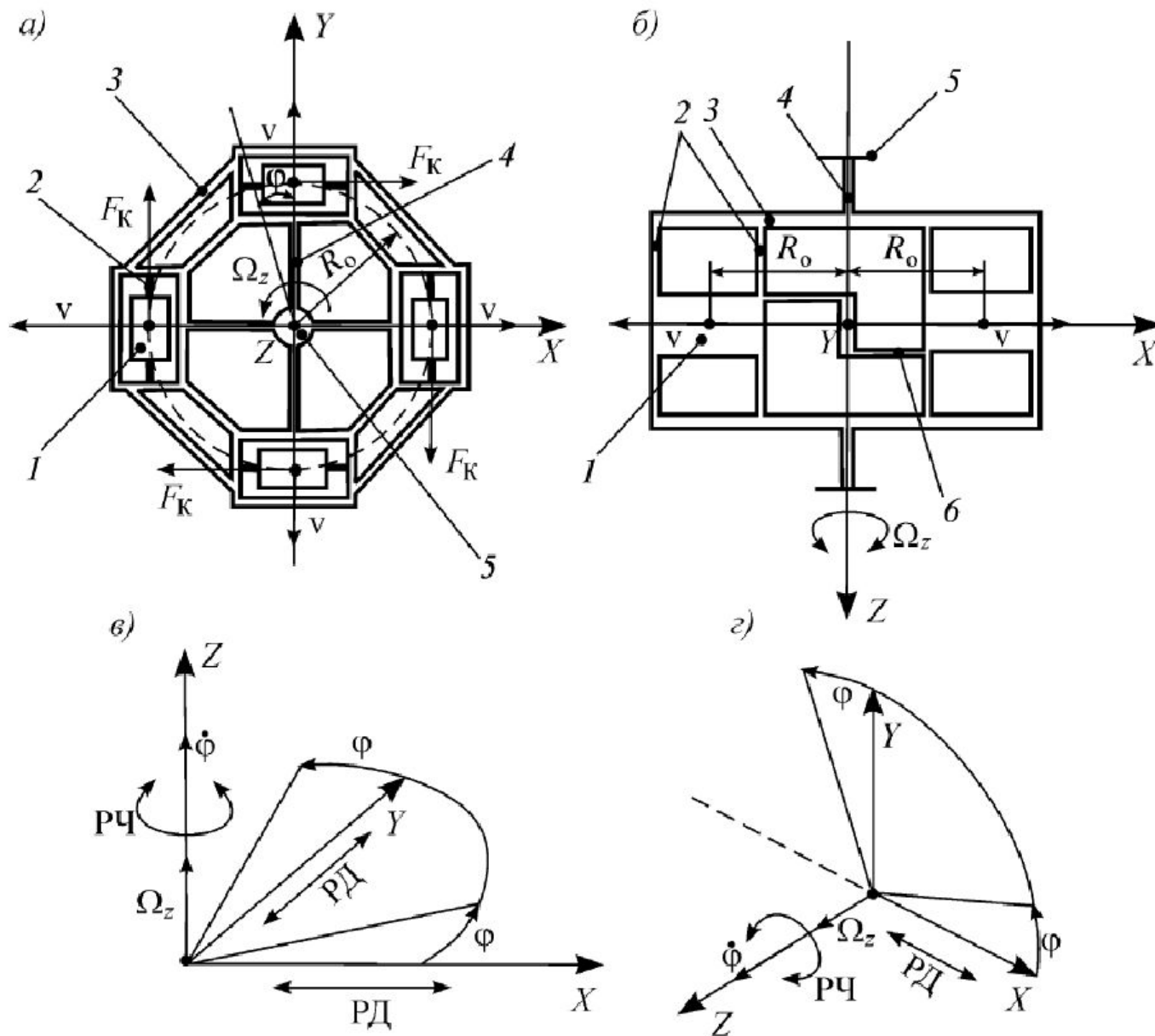


Рис. 1.46. Принципиальные схемы ЧЭ:

а – перемещения ИМ в РД и РЧ в одной плоскости; *б* – то же, в разных плоскостях; *в*, *г* – направления РД и РЧ: 1 – ИМ; 2 – упругие элементы подвеса РД; 3 – жесткие элементы подвеса; 4 – упругие элементы подвеса РЧ; 5 – анкера; 6 – кинематическая связь

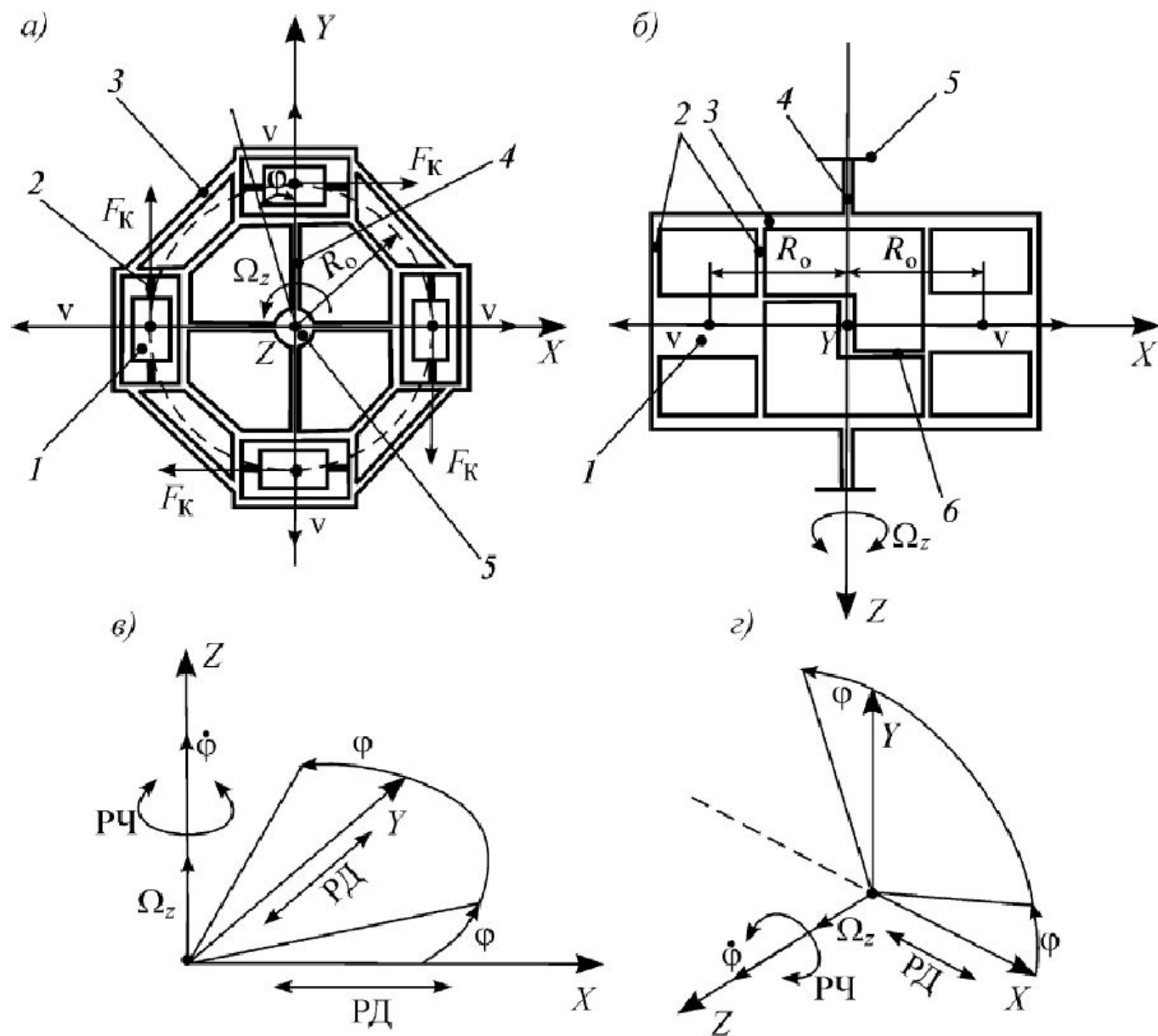


рис. 1.46, а

Из уравнения движения для координаты φ в установившемся режиме следует выражение

$$\varphi = -\frac{8 m v \Omega_z R_o}{G_\varphi}, \quad (1.21)$$

откуда видно, что угол поворота ЧЭ вокруг оси Z содержит информацию об измеряемой угловой скорости. Отметим, что минимальное число конструктивных узлов с ИМ – 2 шт., а максимальное зависит от требуемых характеристик ЧЭ и его габаритных размеров.

Рис. 1.46. Принципиальные схемы ЧЭ:

а – перемещения ИМ в РД и РЧ в одной плоскости; б – то же, в разных плоскостях; в, г – направления РД и РЧ: 1 – ИМ; 2 – упругие элементы подвеса РД; 3 – жесткие элементы подвеса; 4 – упругие элементы подвеса РЧ; 5 – анкера; 6 – кинематическая связь

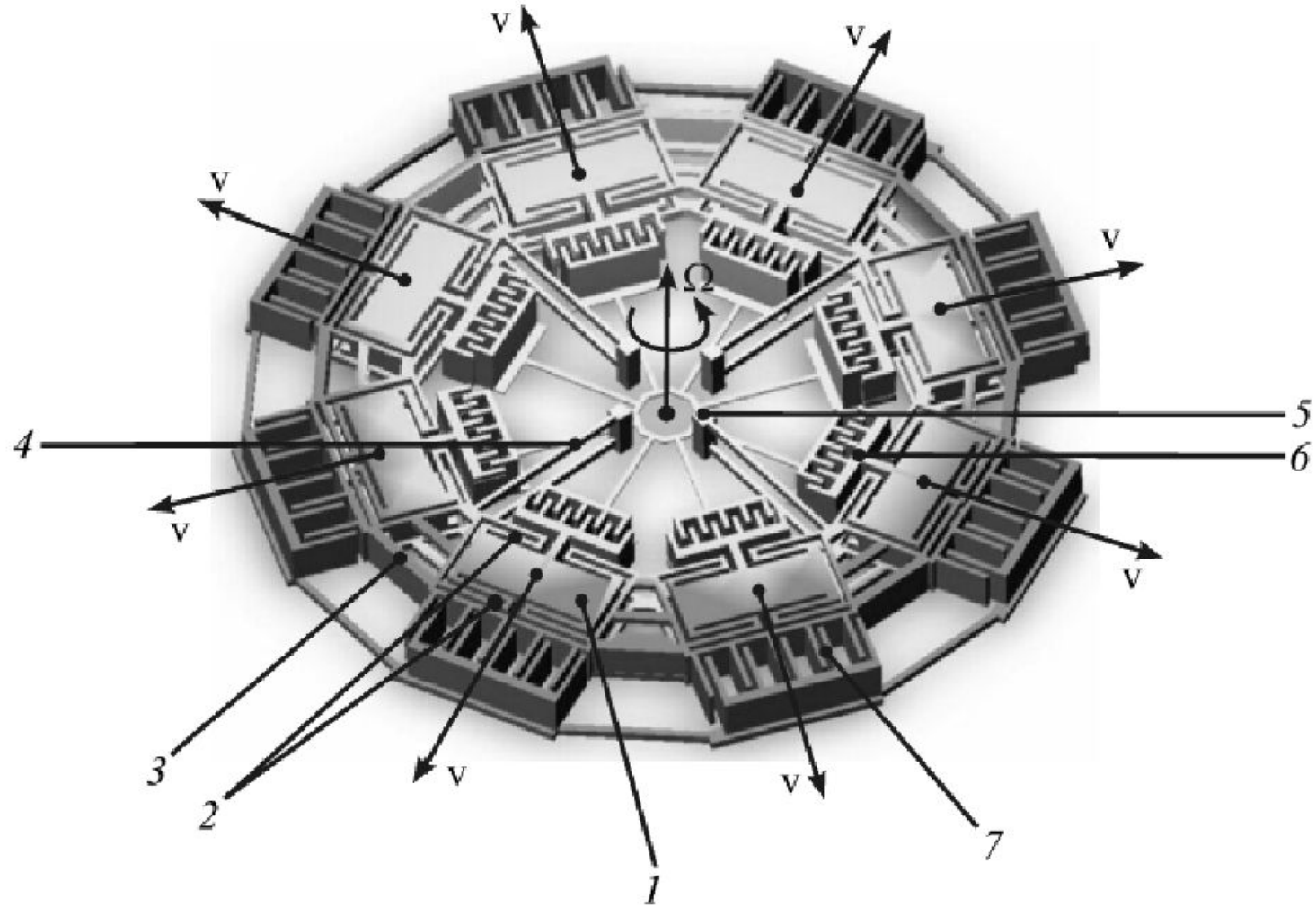


Рис. 1.47. Общий вид конструкции МГ:

1 – ИМ; *2* – упругие элементы подвеса ИМ; *3* – жесткий рамочный элемент конструкции; *4* – упругий элемент подвеса рамки; *5* – анкер; *6* – электростатический двигатель (привод); *7* – емкостный датчик (измеритель) перемещений

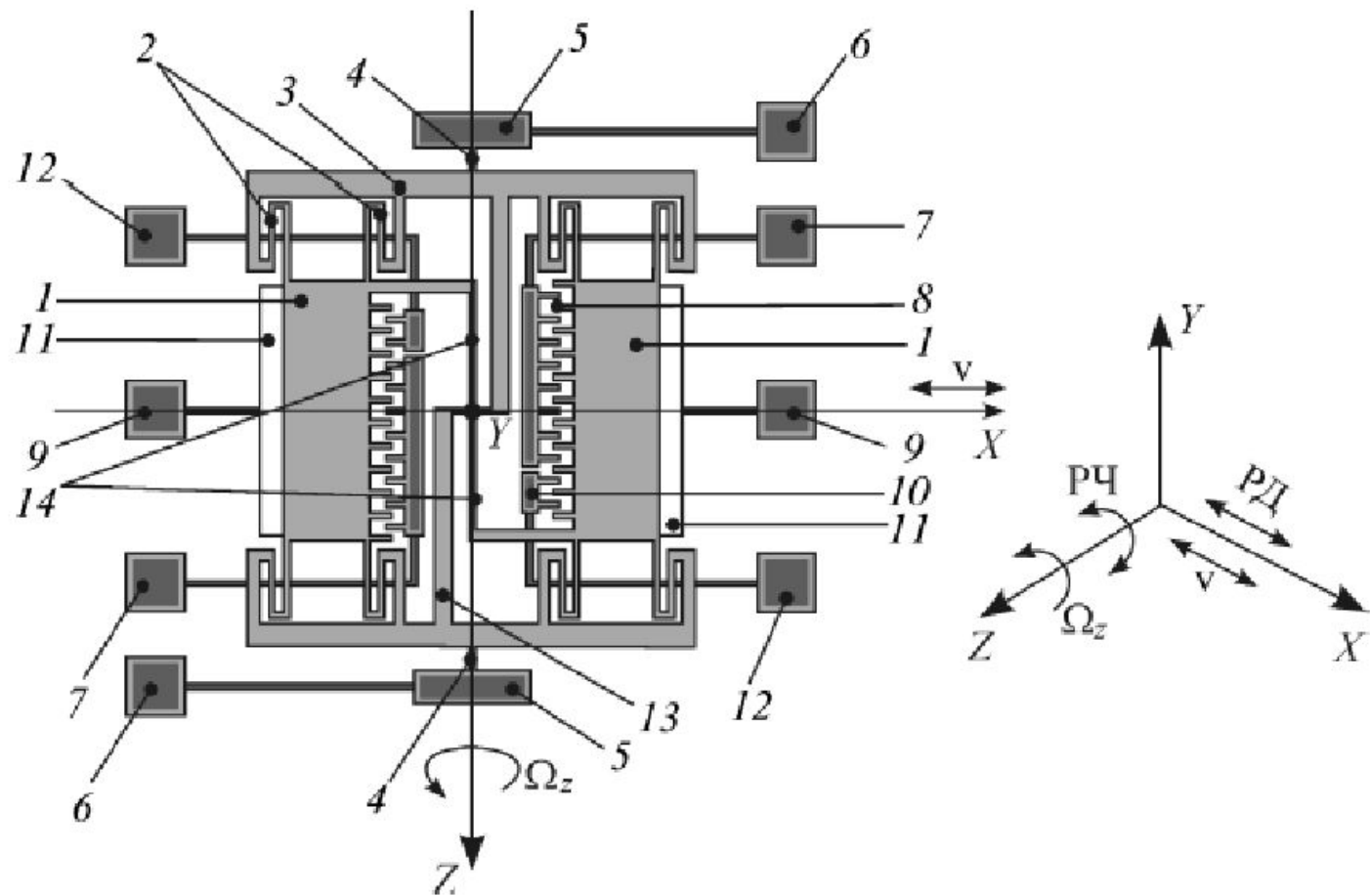


Рис. 1.48. Принципиальная схема МГ фирмы Samsung Electronics:

1 – ИМ; *2* – упругие элементы подвеса; *3, 13* – элементы подвеса; *4* – торсионы; *5* – анкеры; *6, 7, 9, 12* – контактные площадки; *8* – гребенчатая структура электростатического привода; *10* – измеритель перемещений РД; *11* – электроды емкостных измерителей перемещений РЧ; *14* – элементы кинематической связи

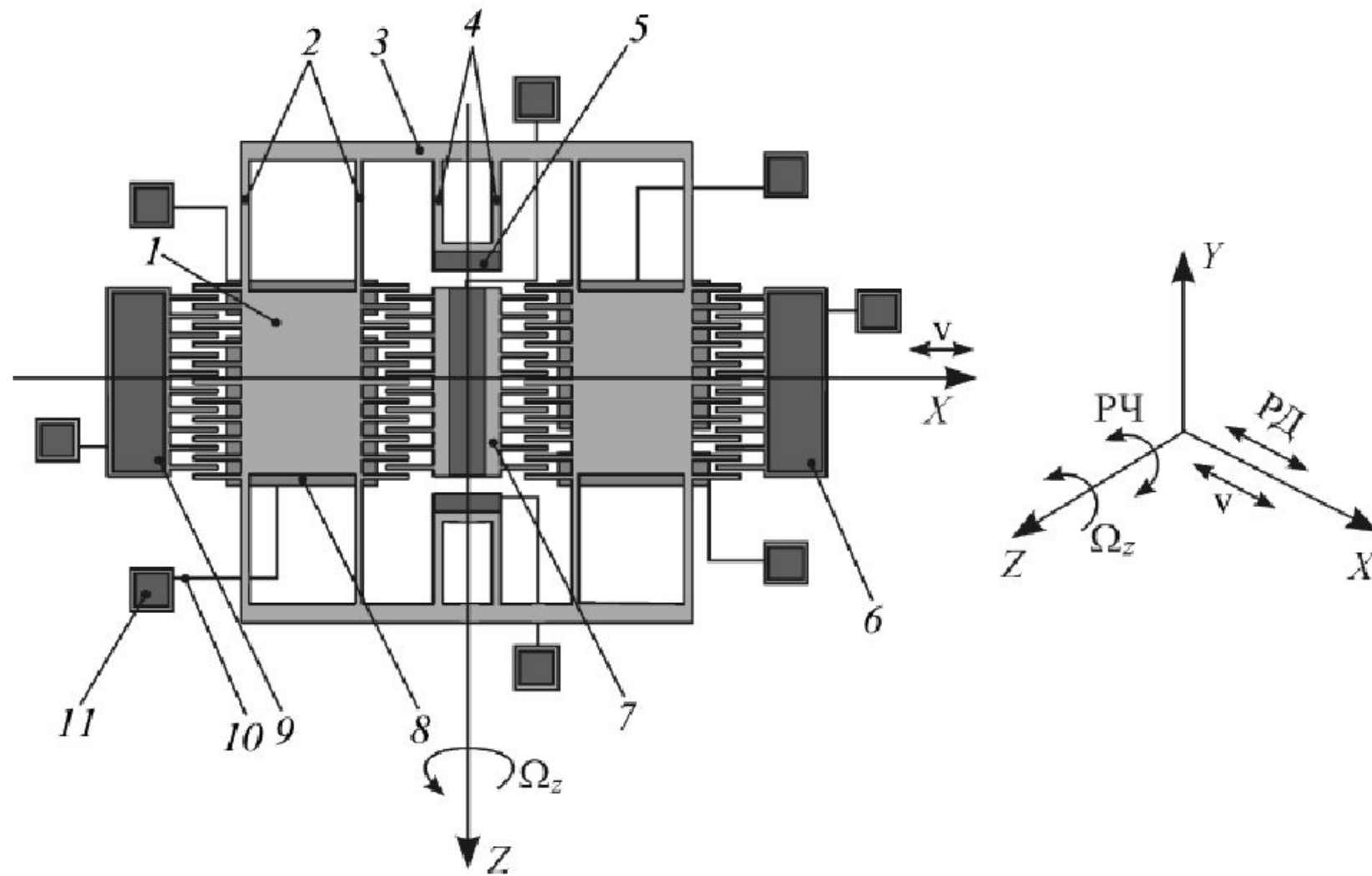


Рис. 1.49. Принципиальная схема МГ разработки Draper Laboratory:

1 – ИМ; 2, 4 – упругие элементы подвеса; 3 – жесткий элемент подвеса; 5 – анкер; 6, 7, 9 – электростатические приводы; 8 – неподвижный электрод емкостного измерителя перемещений; 10 – токоподвод; 11 – контактная площадка

Микрогироскопы RR-типа

В МГ RR-типа движение ИМ в РД и РЧ носит вращательный характер. Сочетание относительного, вращательного движения ИМ в РД и ее переносного, вращательного движения в РЧ приводит к возникновению момента сил инерции Кориолиса, который носит название "гироскопический момент".

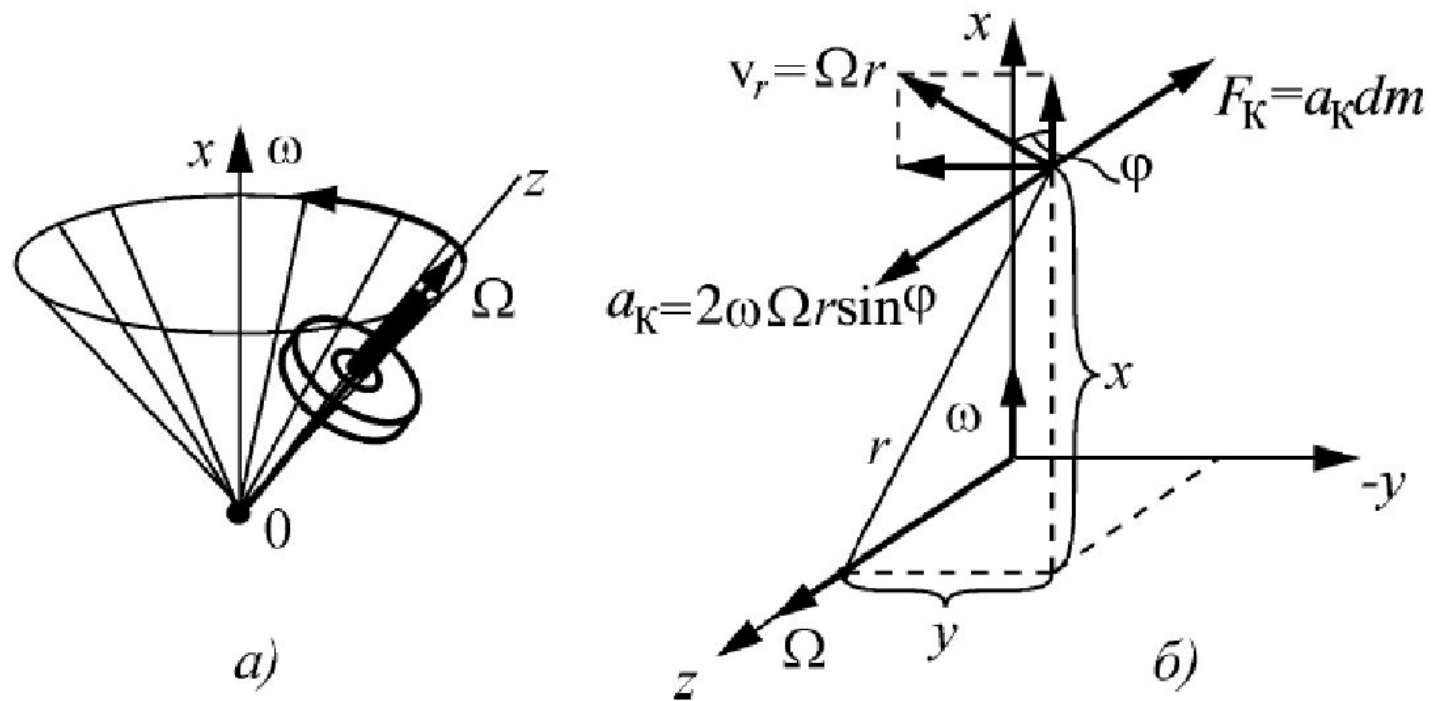
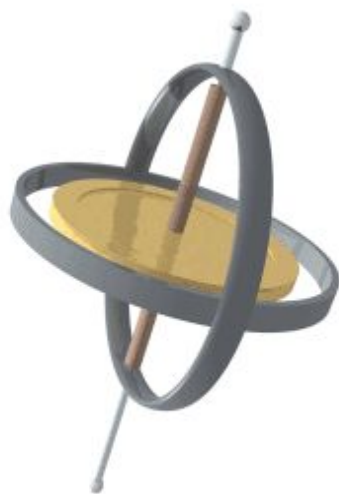


Рис. 1.50. Регулярная прецессия ротора:
a – конус прецессии; *б* – определение силы инерции Кориолиса

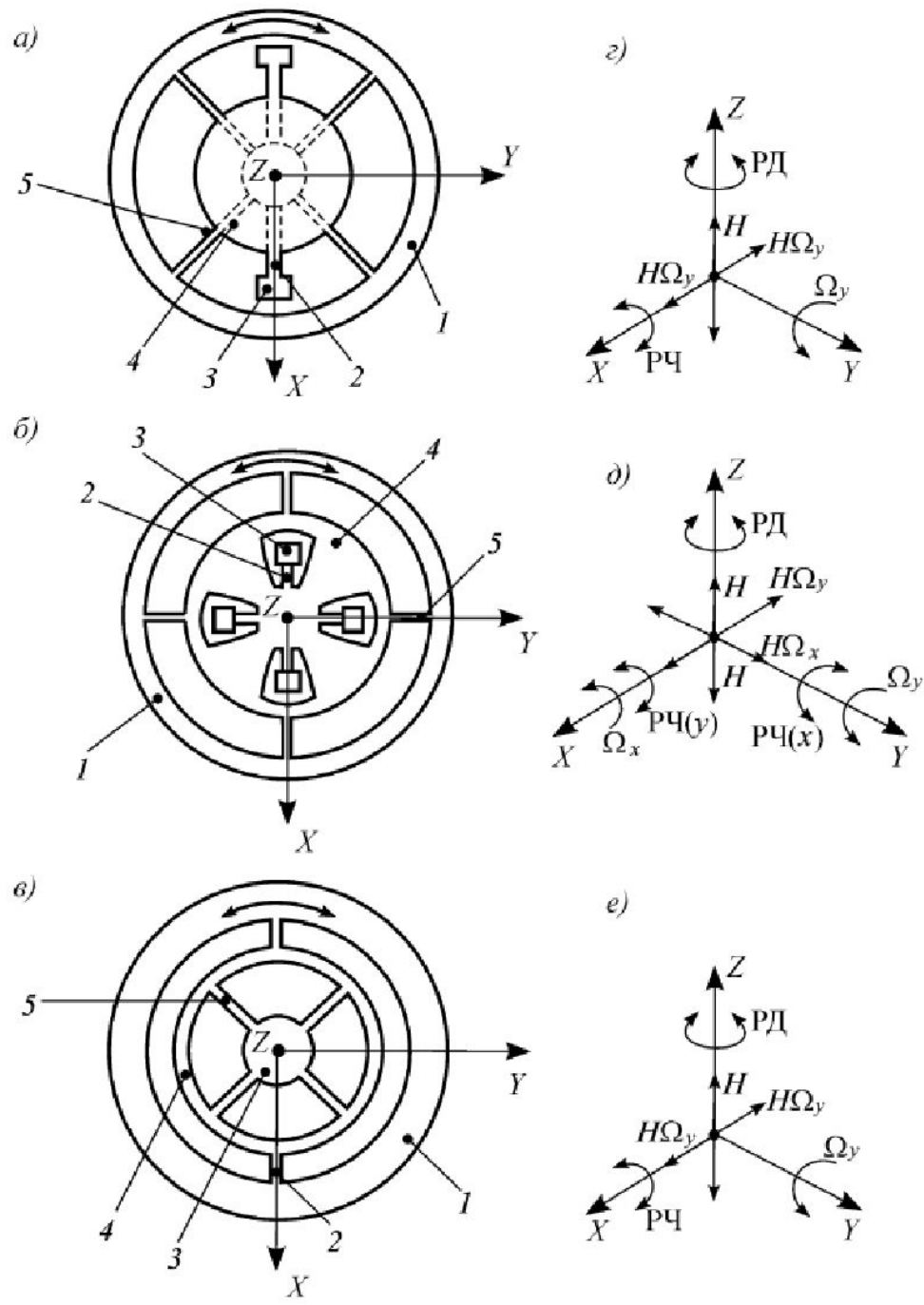
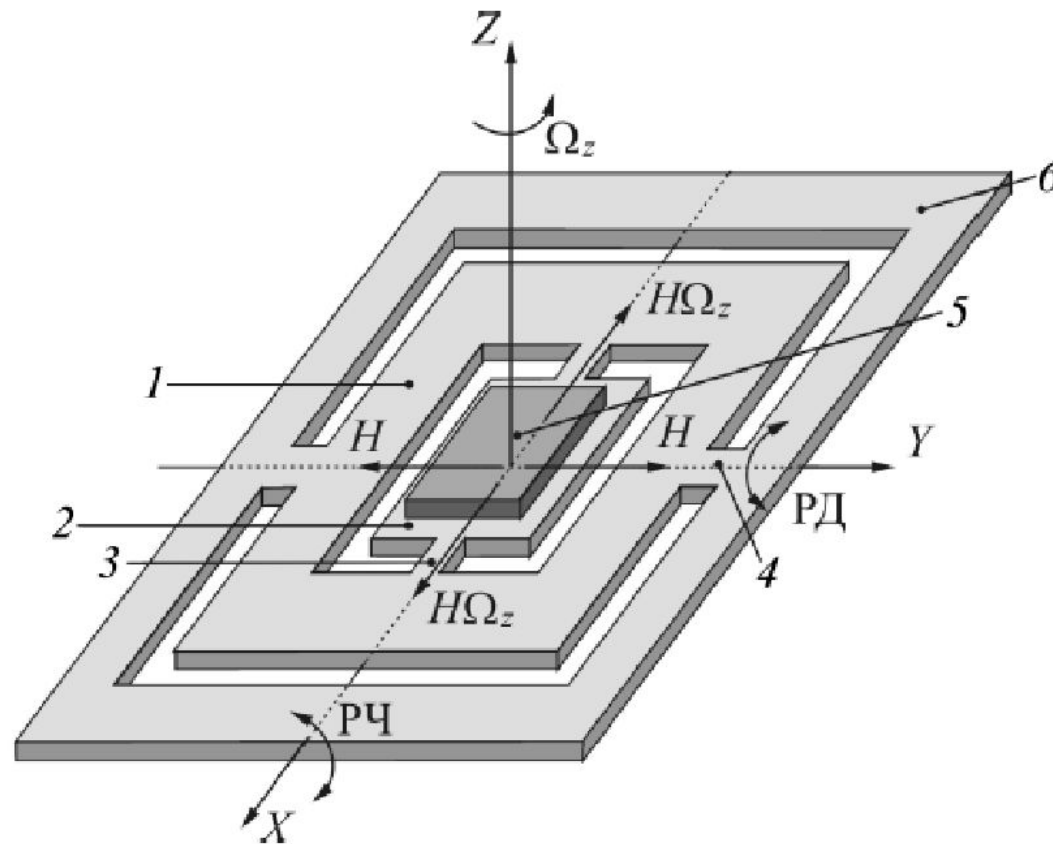


Рис. 1.56. Принципиальные схемы ЧЭ МГ:

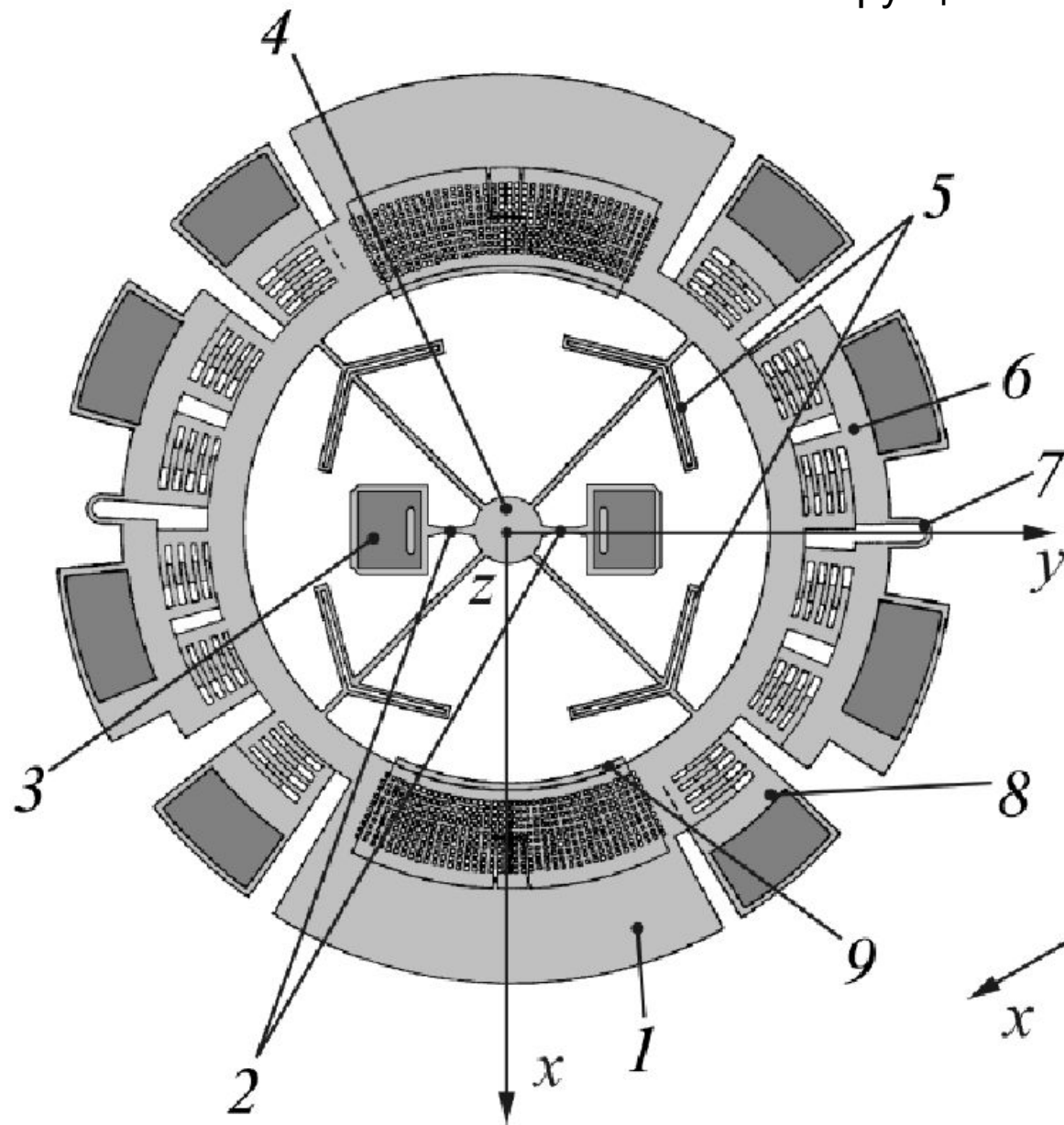
а, б – с непосредственной передачей момента привода на ротор (*а* – однокомпонентный; *б* – двухкомпонентный); *в* – однокомпонентный с возможностью передачи момента привода на ротор непосредственно и через промежуточный элемент; *г, д, е* – режимы работы МГ; *1* – ИМ (ротор); *2, 5* – упругие элементы подвеса; *3* – анкер (элемент крепления микроструктуры к подложке); *4* – промежуточный (кинематический) элемент подвеса

Конструкция микрогироскопов



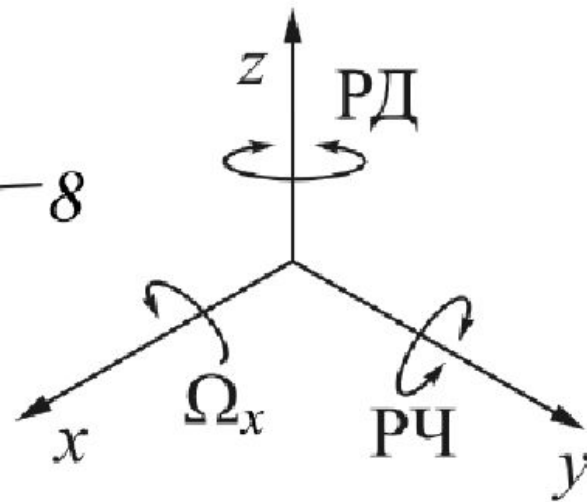
**Рис. 1.57. Принципиальная схема рамочного ЧЭ МГ
фирмы The Charles Stark Draper Laboratory:**
*1, 2 – наружная и внутренняя рамки; 3, 4 – упругие элементы (торсионы);
5 – дополнительная масса; 6 – основание*

Конструкция микрогироскопов



**Рис. 1.58. Принципиальная схема МГ
фирмы The Charles Stark Draper
Laboratory:**

1 – ИМ (ротор); 2 – упругие элементы-растяжки (торсионы); 3 – анкер; 4 – кинематический элемент подвеса; 5 – упругие элементы подвеса с петлевыми образованиями; 6, 8 – статоры электростатического привода; 7 – петля-компенсатор; 9 – электрод емкостного измерителя перемещений



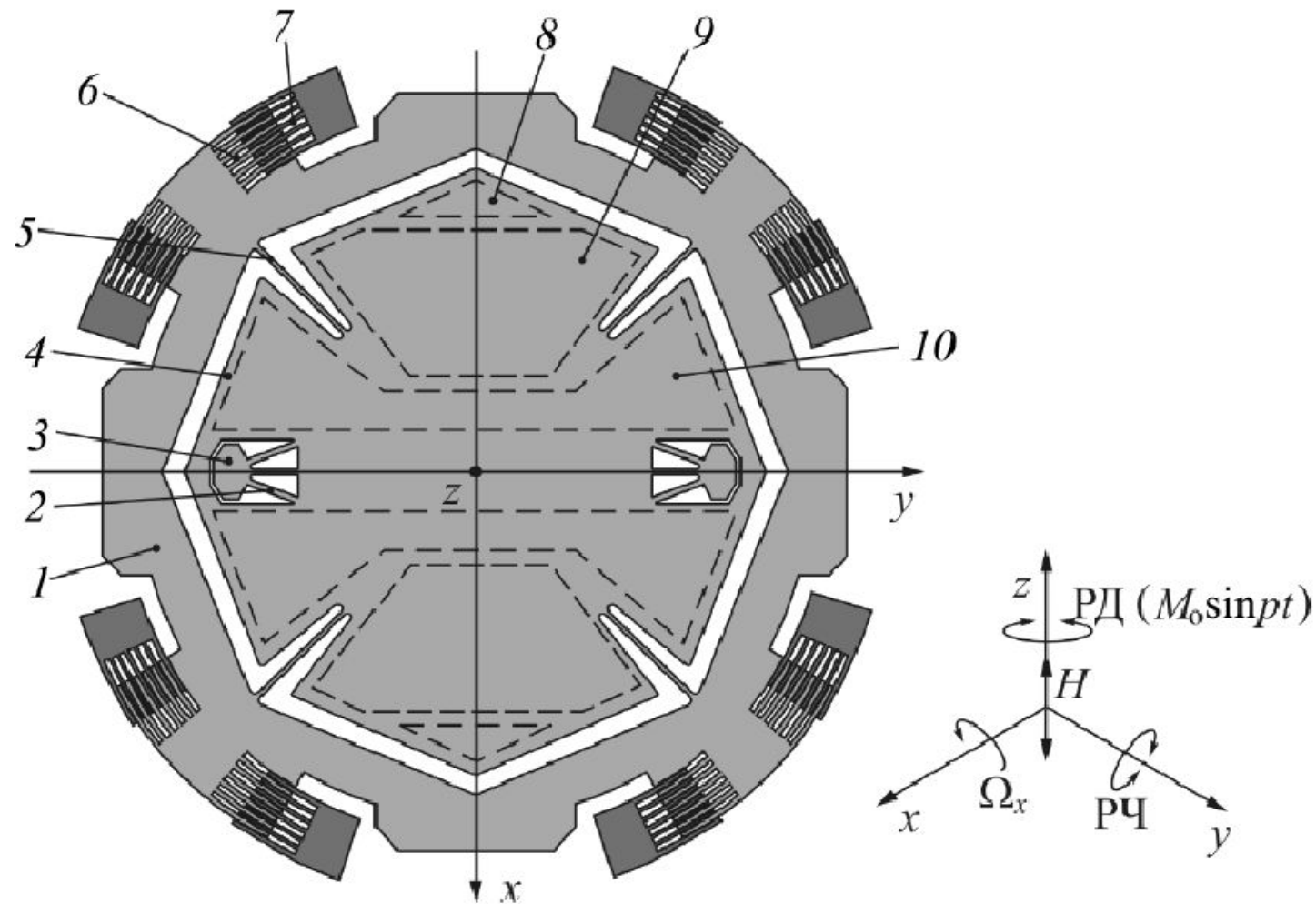


Рис. 1.59. Принципиальная схема МГ фирмы Irvine Sensors Corp.:

1 – ИМ (ротор); 2, 5 – упругие элементы подвеса; 3 – анкер; 4 – кинематический элемент подвеса; 6, 7 – гребенчатые структуры электростатического привода; 8 – электрод контура калибровки и тестирования; 9 – электрод емкостного преобразователя перемещений; 10 – электрод датчика силы

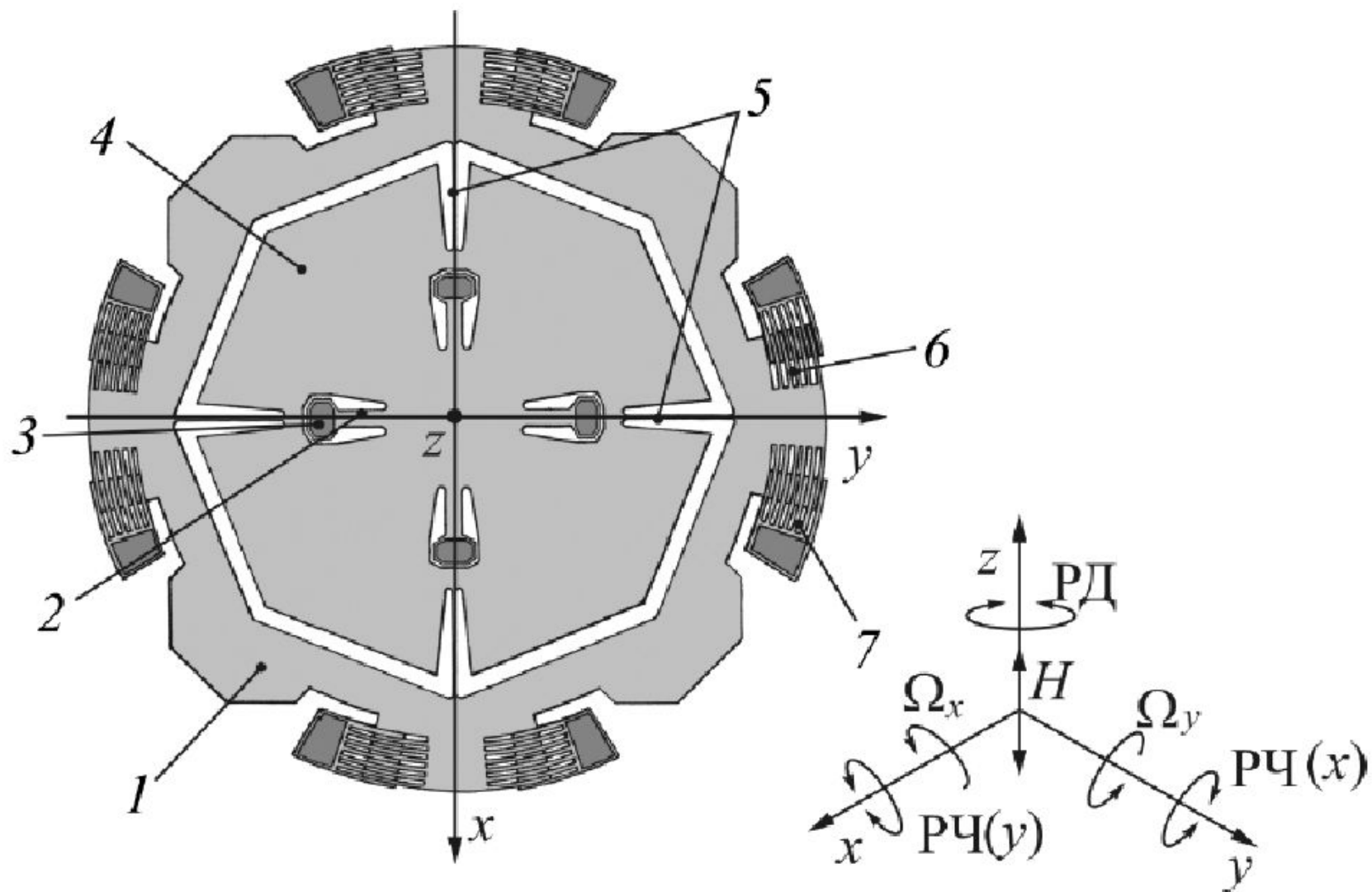
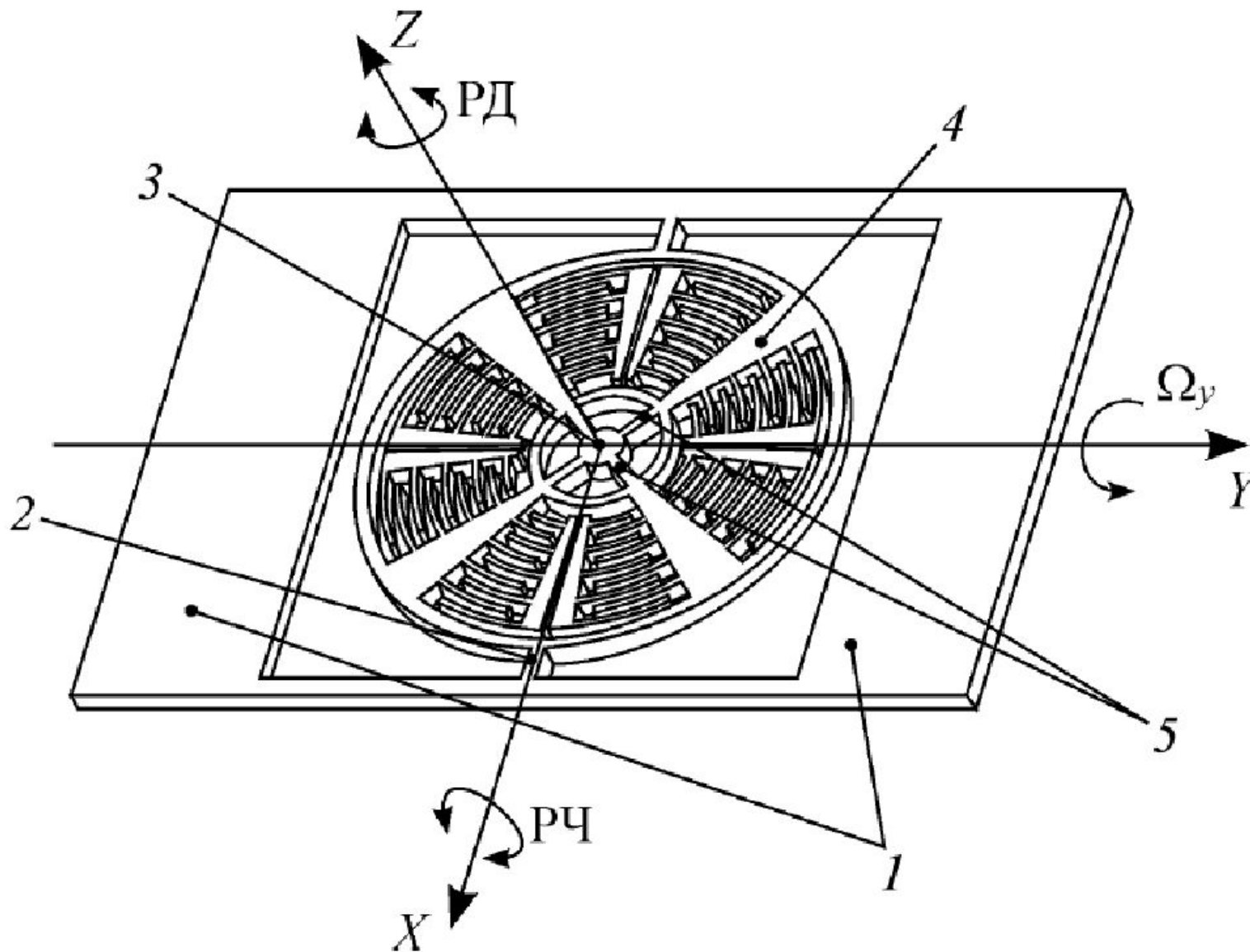


Рис. 1.60. Принципиальная схема МГ для измерения двух угловых скоростей (двухкомпонентный МГ). Оцифровка соответствует рис. 1.59



**Рис. 1.61. Принципиальная схема МГ института HSG-IMIT
(оцифровка соответствует рис. 1.56, в)**

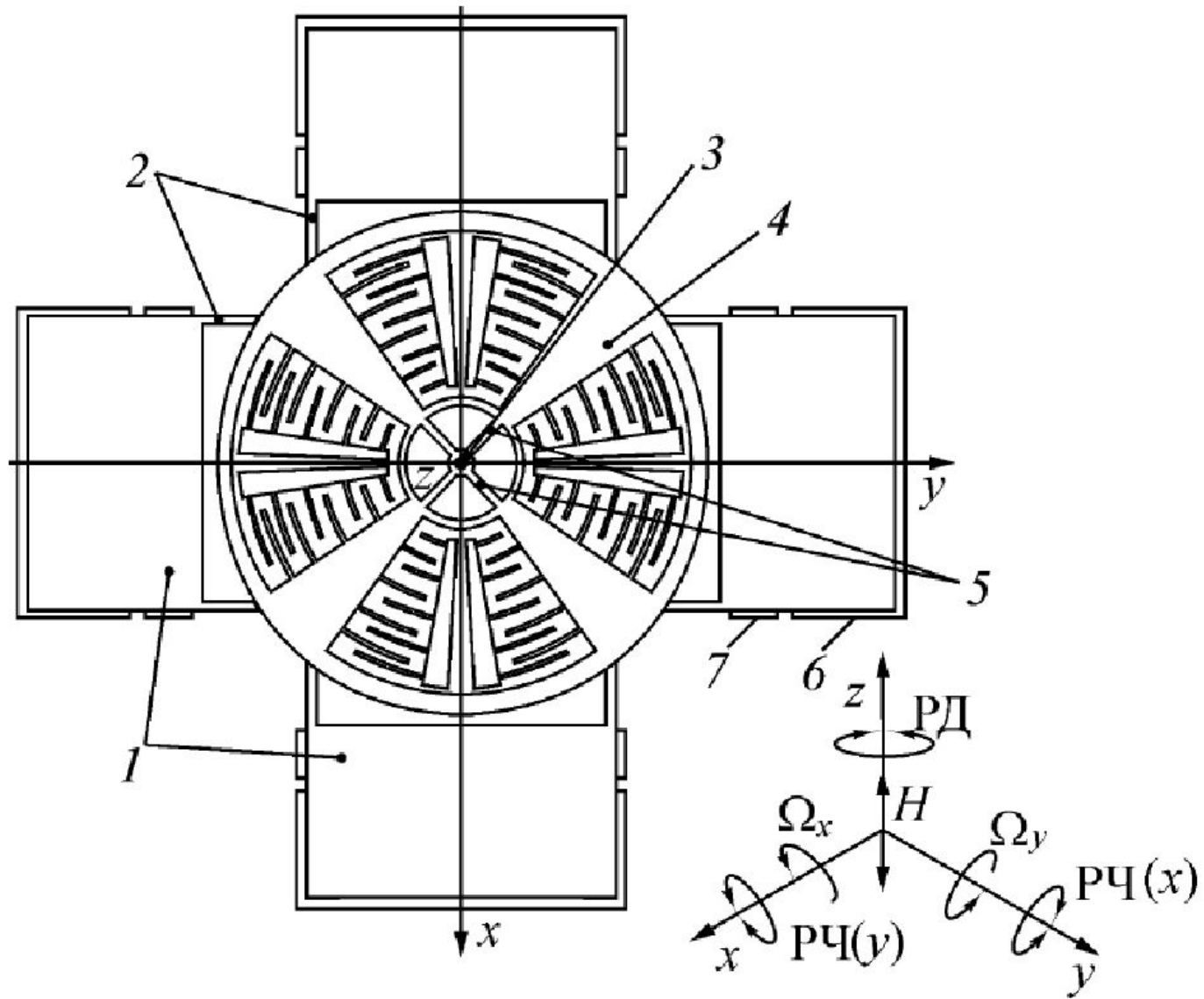


Рис. 1.62. Принципиальная схема двухкомпонентного МГ
(оцифровка та же, что на рис. 1.56, в)

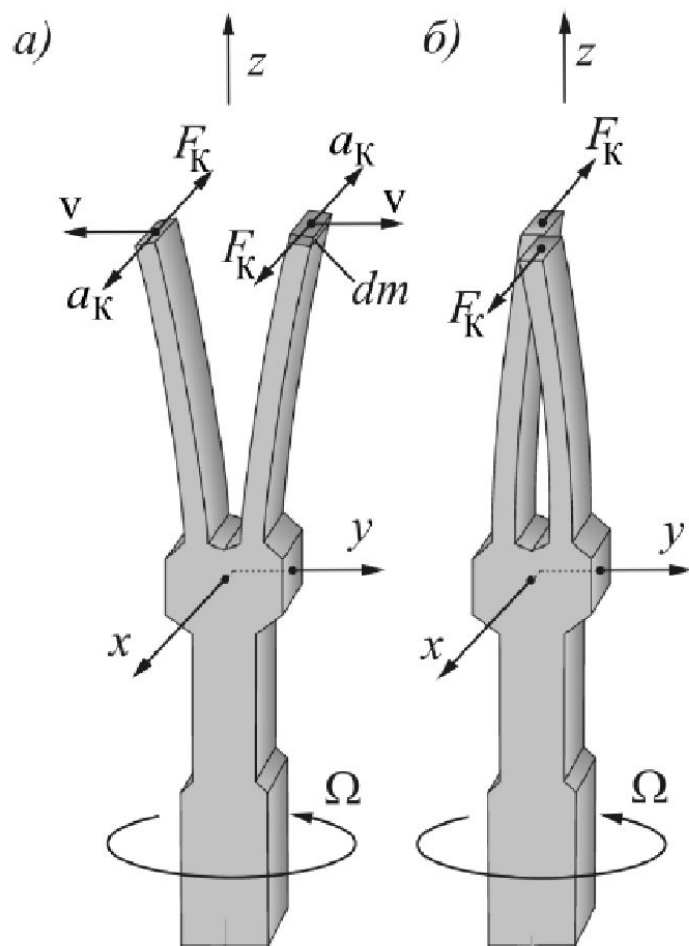


Рис. 1.63. Принцип работы ЧЭ камертонного гироскопа:

a – возбуждаемые колебания;

б – вынужденные (информативные) колебания

Обе ветви ЧЭ, изготовленного из монокристалла, приводятся в противофазное колебательное движение в плоскости zy (рис. 1.63, *a*). Каждый элемент ветви массой dm перемещается с линейной скоростью v . При вращении ЧЭ со скоростью Ω вокруг оси z для направления векторов, соответствующих рис. 1.63, *a*, возникают ускорения Кориолиса $a_K = 2v\Omega$ и соответствующие ему силы инерции $F_K = 2v\Omega dm$. Силы инерции Кориолиса суммируются по всей массе каждой из ветвей и приводят к их изгибу в плоскости xz (рис. 1.63, *б*).

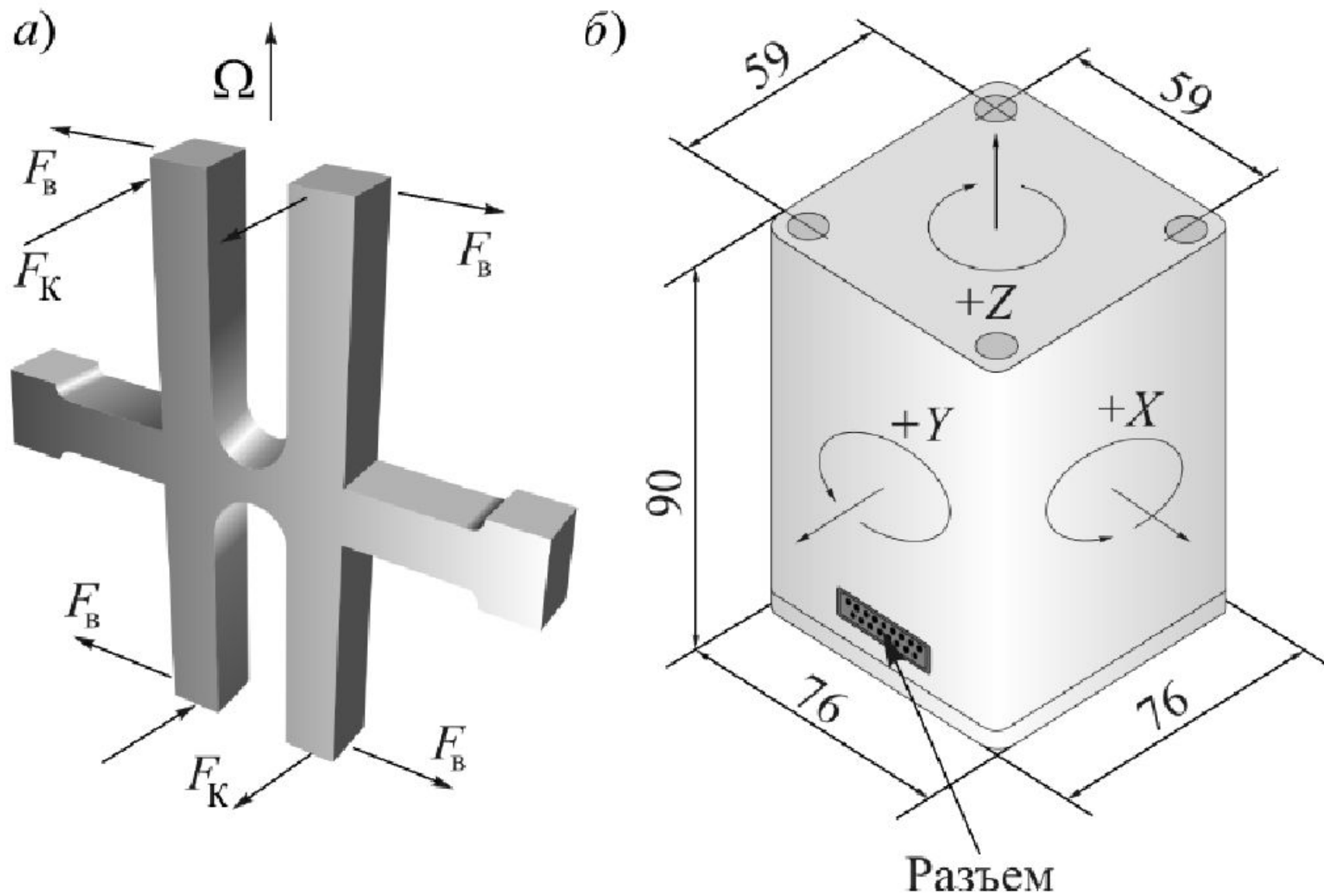


Рис. 1.64. Инерциальный блок:
 а – схема ЧЭ; б – габаритные размеры и оси чувствительности

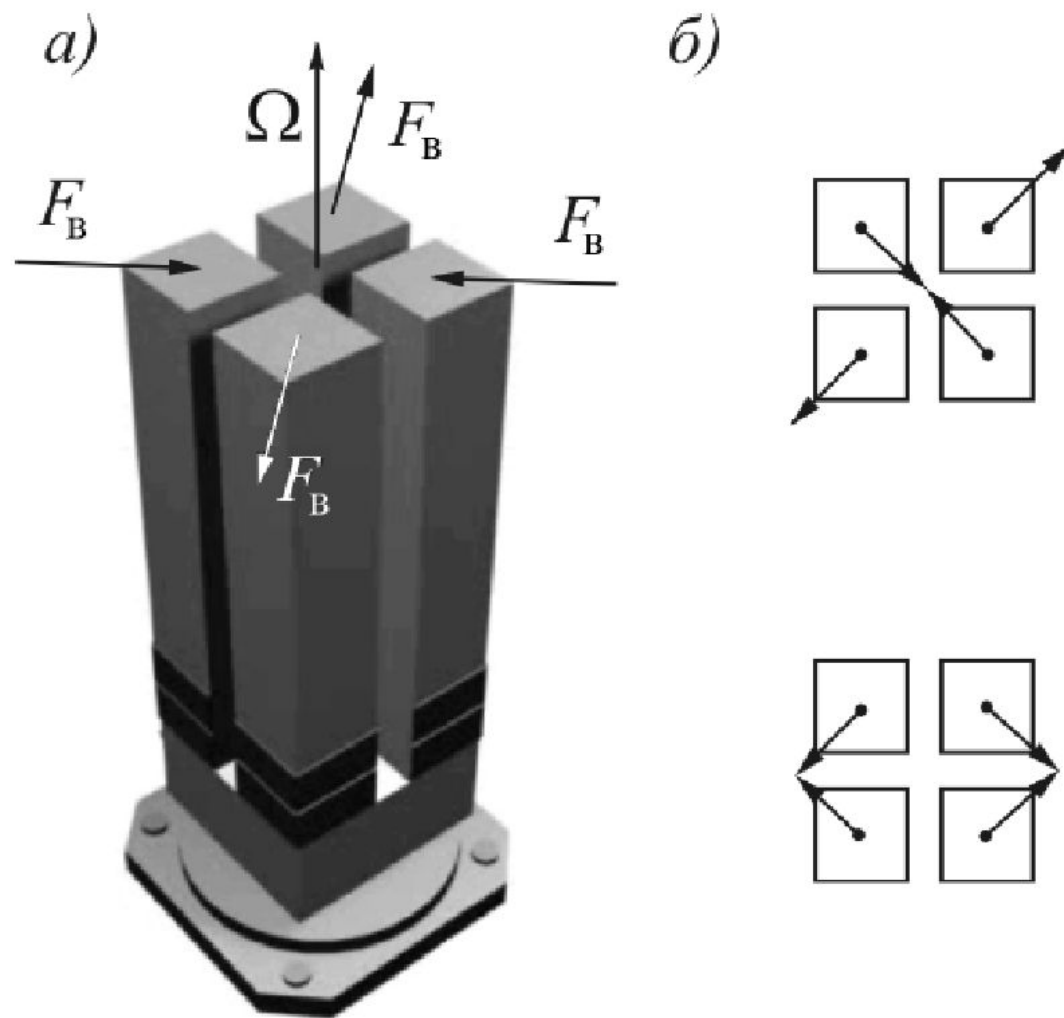


Рис. 1.65. Резонатор гироскопа Quarason™:

a – аксонометрический вид и возможное направление сил возбуждения F_B ;
б – режимы колебания стержней

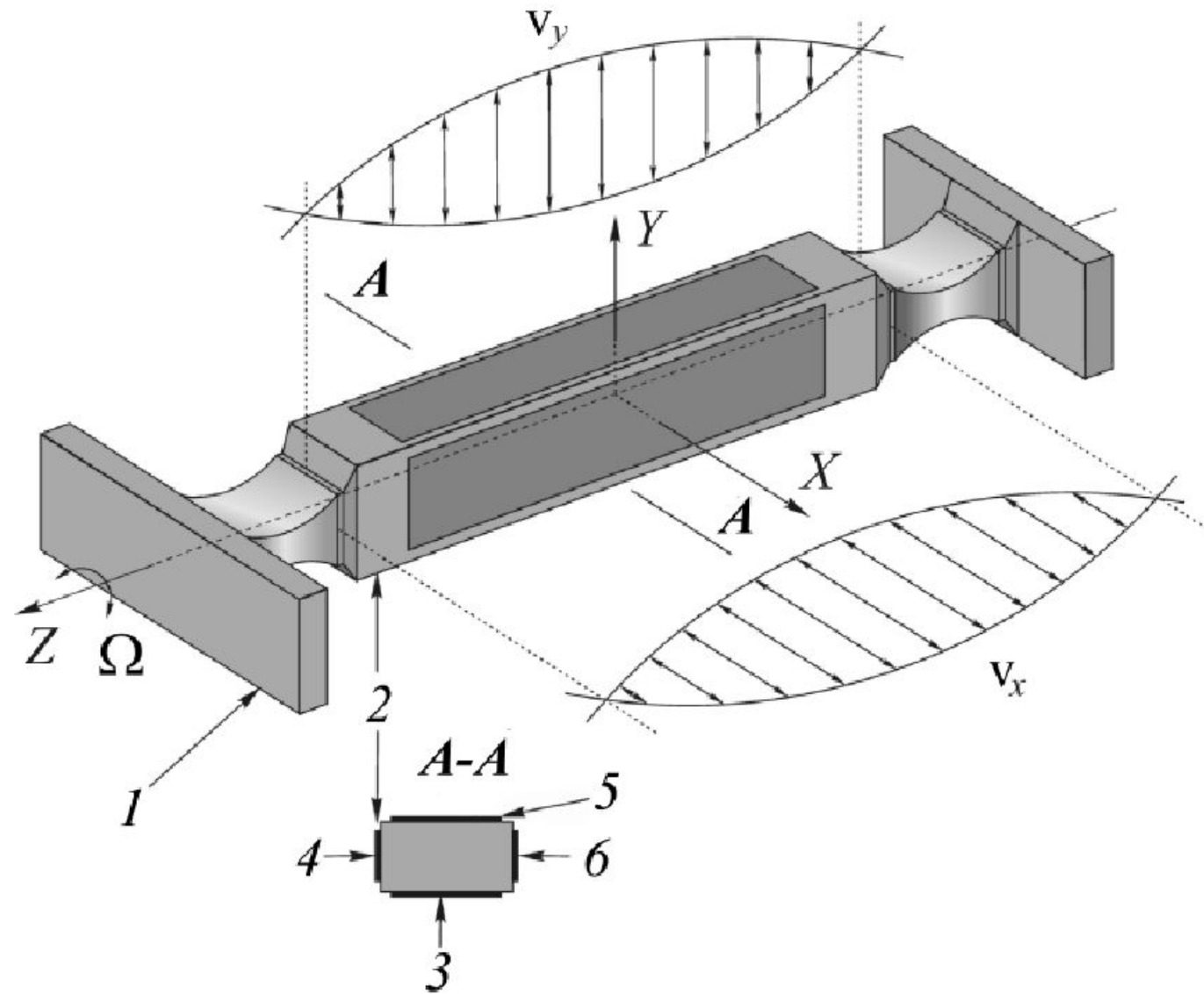


Рис. 1.66. Схема стержневого (волнового) вибрационного гироскопа:
1 – корпус; *2* – стержень; *3–6* – пьезоэлементы

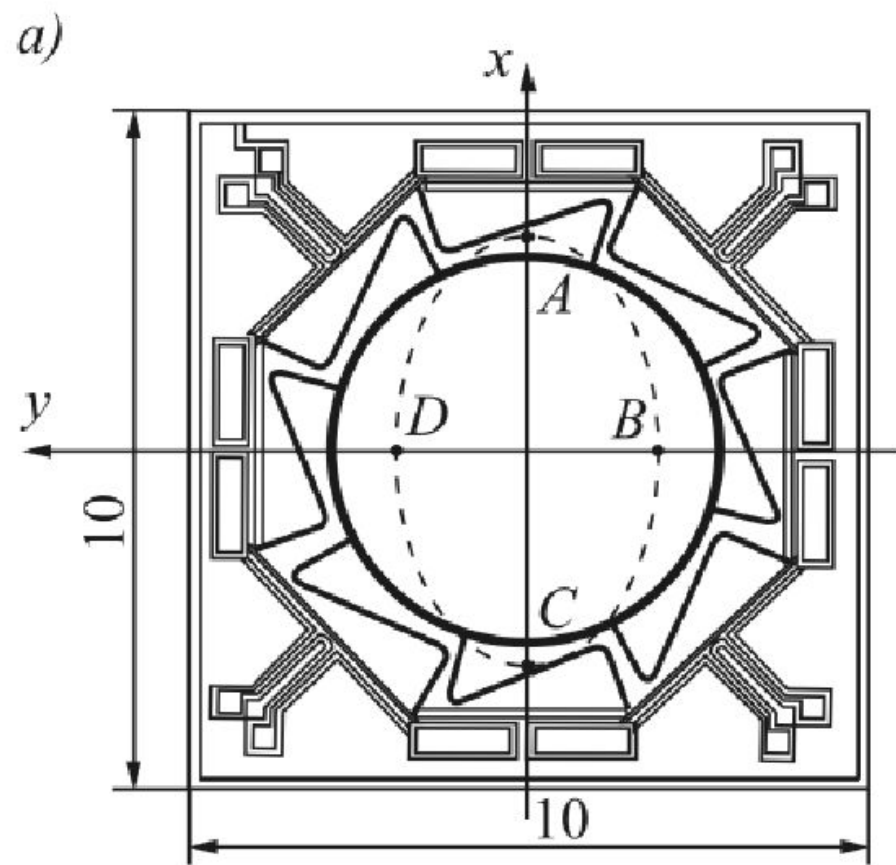


Рис. 1.67. ЧЭ МГ с кольцевым резонатором:
a – принципиальная схема; *б* – фрагмент микроструктуры резонатора