
**ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРИБОРЫ, МОДЕЛИ
И МЕТОДЫ АНАЛИЗА**

УДК 53.087.92: 62–752.4

© А. С. Ковалёв, Д. Г. Грязин, Ю. В. Шадрин, Д. И. Лычёв

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С СОВМЕЩЕННЫМИ
ЧАСТОТАМИ ПО ОСЯМ ПЕРВИЧНЫХ И ВТОРИЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ**

Рассматриваются режимы работы микромеханического гироскопа (ММГ) R-R типа с совмещенными и разнесенными частотами первичных и вторичных колебаний. Рассмотрены методы совмещения частот колебаний. Приведены теоретические исследования, показывающие преимущества работы в режиме с совмещенными частотами. Предложены результаты экспериментальных исследований ММГ в режимах совмещенных и разнесенных частот. Теоретические предпосылки подтверждены результатами экспериментальных исследований.

ВВЕДЕНИЕ

Преимущества микромеханических чувствительных преобразователей перед традиционными измерителями очевидны. Именно в связи с ними в настоящее время наблюдается столь бурное развитие этого направления в измерительной технике. Одним из наиболее сложных датчиков в ряду преобразователей механических величин является микромеханический датчик угловой скорости, который принято называть микромеханическим гироскопом (ММГ).

Известно [1], что ММГ может функционировать в режиме совмещенных частот, который характеризуется тем, что частоты мод колебаний ротора по осям первичных и вторичных колебаний одинаковы, а также в режиме разнесенных частот, когда частоты мод колебаний по этим осям отличаются на полосу пропускания прибора. В первом случае, использование резонансных свойств механической системы позволяет достичь более высокой чувствительности прибора и меньшего уровня шумов. Однако реализация такого режима работы связана с алгоритмическими и технологическими трудностями.

**КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА
И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ММГ**

ЦНИИ "Электроприбор" в течение нескольких лет занимается разработкой отечественного серийного кремниевого микромеханического гироскопа [2]. Конструктивная схема разработанного чувствительного преобразователя представлена на рис. 1.

Принцип действия приведенного ММГ заключается в следующем. Ротор гироскопа совершает угловые автоколебания относительно оси Z . При появлении угловой скорости движения основания

преобразователя относительно оси его чувствительности Y возникает момент Кориолиса, вызывающий изгиб краев ротора относительно оси вторичных колебаний X . Указанный изгиб происходит с частотой первичных колебаний, а его амплитуда пропорциональна действующей угловой скорости. Отмеченное явление представляет собой колебания ротора по выходной оси, которые преобразуются в выходной электрический сигнал датчика.

Для стабилизации первичных колебаний ротора ММГ оснащен системой управления, в состав которой входит датчик угла первичных колебаний и электростатический датчик момента. Датчик угла содержит две гребенчатых структуры, зубья которых имеют взаимные площади перекрытия. Одна из "гребенок" сформирована в теле ротора, а вторая, неподвижная, является статором; при этом сам статор формируется внутри специальных окон, вытравленных в теле ротора. Электростатический двигатель сформирован по аналогичной схеме. С целью обеспечения требуемой добротности первичный чувствительный преобразователь вакуумирован.

Для измерения вторичных колебаний ротора, несущих информацию об угловой скорости движения ММГ, в его конструкции предусмотрены емкостные датчики углов, расположенные симметрично в противоположных частях преобразователя. С целью реализации обратной связи рядом с ними установлены электростатические датчики моментов, металлизированные обкладки которых расположены на подложке основания.

УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ ММГ

В первом приближении динамика ротора описывается системой уравнений:

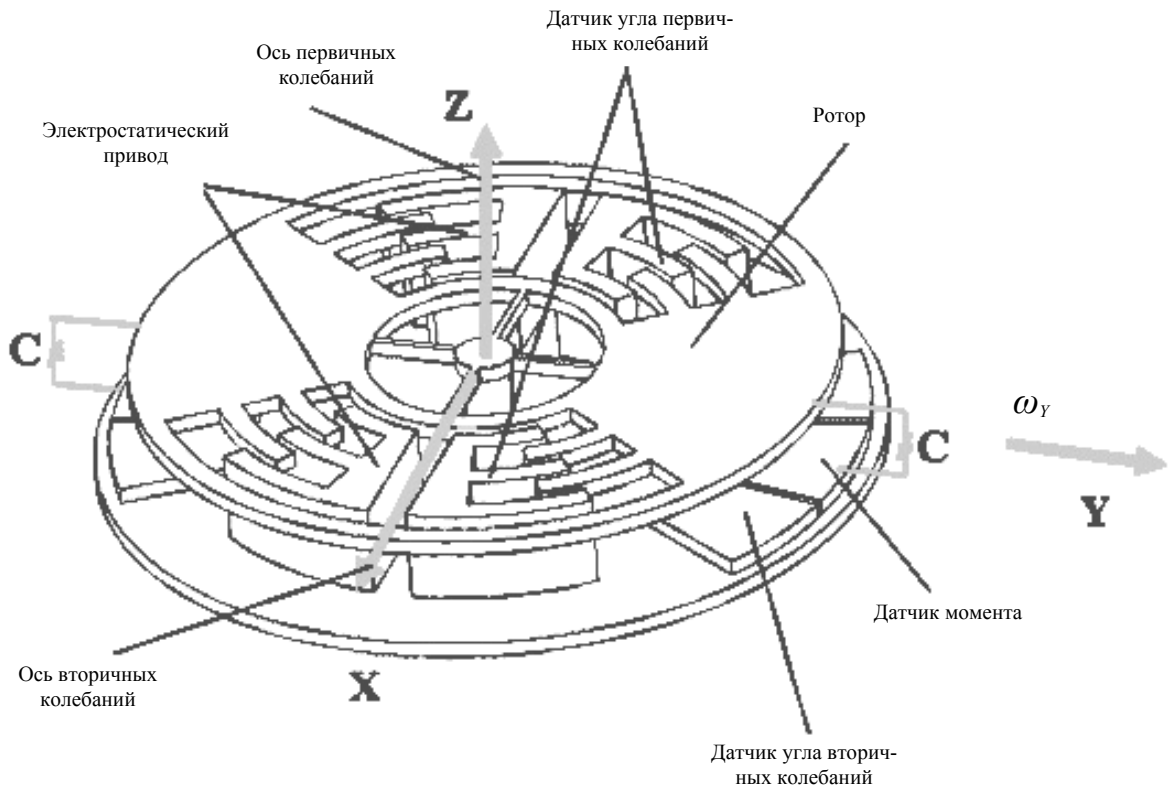


Рис. 1. Конструктивная схема ММГ

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} + \xi_{\alpha}\dot{\alpha} + v_{\alpha}^2\alpha &= m_x / J_x; \\ \dot{\gamma} + \xi_{\gamma}\dot{\gamma} + v_{\gamma}^2\gamma &= m_z / J_z, \end{aligned} \quad (1)$$

где α — угол отклонения ротора по оси вторичных колебаний; v_{α} — собственная частота ротора относительно оси X (частота вторичных колебаний); v_{γ} — собственная частота ротора относительно оси Z (частота первичных колебаний); ξ_{α} — степень успокоения по оси вторичных колебаний, ξ_{γ} — степень успокоения по оси первичных колебаний; m_z — момент, развиваемый ЭСДС; m_x — момент внешних сил, действующий по оси вторичных колебаний; J_z — момент инерции ротора ММГ относительно оси первичных колебаний; J_x — момент инерции ротора ММГ относительно оси вторичных колебаний.

Уравнениям системы (1) соответствуют передаточные функции вида

$$W_{\gamma}(s) = \frac{1/J_z}{s^2 + 2\xi_{\gamma}v_{\gamma}s + v_{\gamma}^2}, \quad (2)$$

$$W_{\alpha}(s) = \frac{1/J_x}{(s^2 + 2\xi_{\alpha}v_{\alpha}s + v_{\alpha}^2)}, \quad (3)$$

где $W_{\gamma}(s)$ — передаточная функция ротора ММГ по оси первичных колебаний; $W_{\alpha}(s)$ — передаточная функция ротора ММГ по оси вторичных колебаний.

В рабочем режиме ротор гироскопа совершает угловые колебания относительно оси первичных колебаний с заданной амплитудой; при этом можно положить

$$\dot{\gamma} = \gamma_0 v_{\gamma} \sin(v_{\gamma} t),$$

где γ_0 — заданная амплитуда первичных колебаний ротора ММГ, рад.

При появлении угловой скорости движения основания образуется момент Кориолиса, действующего по оси вторичных колебаний:

$$M_x = (J_z - J_x)\dot{\gamma}\omega_Y.$$

В силу этого момент Кориолиса является знакопеременным и следует на частоте первичных колебаний. В операторной форме момент Корио-

леса может быть переписан в виде

$$M_{\kappa}(s) = \frac{(J_Z - J_X)\gamma_0 v_{\gamma}^2}{(s^2 + v_{\gamma}^2)} \omega_{\gamma}.$$

Исследуя воздействие момента Кориолиса на вторичную ось, нетрудно получить выражение для механического масштабного коэффициента ММГ $K_{\text{ММГ}}$, представляющего собой отношение угла отклонения ротора α к действующей угловой скорости ω_{γ} :

$$K_{\text{ММГ}} = \frac{\alpha}{\omega_{\gamma}} = \frac{(J_Z - J_X)v_{\gamma}\gamma_0/J_X}{\sqrt{(v_{\gamma}^2 - v_{\alpha}^2)^2 + 4\xi_{\alpha}^2 v_{\gamma}^2 v_{\alpha}^2}}. \quad (4)$$

Как видно из выражения (4), масштабный коэффициент ММГ существенно зависит от разности частот v_{γ} , v_{α} и от степени успокоения по выходной оси ξ_{α} . Максимальное значение масштабного коэффициента будет достигнуто в случае совмещения частот первичных и вторичных колебаний ротора ММГ, т. е. при выполнении условия резонансной настройки

$$v_{\alpha} = v_{\gamma}. \quad (5)$$

На рис. 2 приведен график зависимости масштабного коэффициента от частоты вторичных колебаний v_{α} , соответствующий выражению (5). При этом полоса пропускания датчика ω_{Π} определяется выражением

$$\omega_{\Pi} = \xi_{\alpha} v_{\alpha}. \quad (6)$$

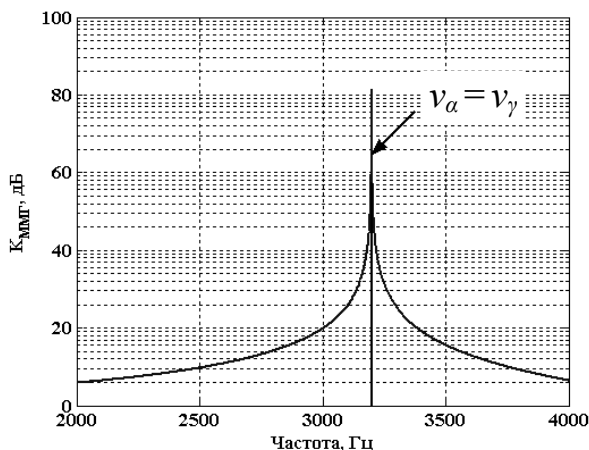


Рис. 2. Зависимость масштабного коэффициента ММГ от разности частот

Влияние параметра ξ_{α} на характеристики ММГ является существенным, т. к. (из выражения (4)) он определяет высоту резонансного пика и механическое усиление сигнала, вырабатываемого системой съема ММГ. Чем меньше параметр ξ_{α} , тем больше масштабный коэффициент ММГ. С другой стороны, из выражения (6) следует, что, чем меньше параметр ξ_{α} , тем меньше полоса пропускания датчика. Таким образом, при работе с совмещенными частотами требуется выбрать значение параметра ξ_{α} таким, чтобы обеспечить требуемую полосу пропускания ММГ при увеличении его масштабного коэффициента.

Следует отметить, что в связи с дебалансом ротора, вызванным также технологическими особенностями, в выходном сигнале датчика присутствует наряду с синфазной еще и квадратурная составляющая, которая может быть скомпенсирована введением в конструкцию дополнительных датчиков моментов.

РЕЖИМ СОВМЕЩЕННЫХ ЧАСТОТ

Выше было показано, что повышение точностных характеристик ММГ возможно с использованием режима совмещенных частот. На практике идеальное совмещение частот ММГ при изготовлении технологически неосуществимо. Технологические погрешности, возникающие при травлении кремниевых торсионов ММГ, приводят к тому, что его собственные частоты по оси первичных и вторичных колебаний оказываются разнесенными друг относительно друга. Известны различные способы совмещения частот, ориентированные либо на технологическую доработку торсионов, либо на изменение их собственной частоты по оси выходных колебаний электрическими способами. Последний путь представляется наиболее эффективным с точки зрения массового производства, т. к. не требует проводить дополнительные технологические операции по доработке конструкции.

Совмещение частот электрическим способом возможно двумя методами.

а. Подачей постоянного напряжения смещения U на обкладки датчика момента (рис. 3, а, б). При этом образуются силы электростатического взаимодействия

$$F_{1,2} = -\frac{\partial W_{1,2}}{\partial d_{1,2}} = -\frac{\varepsilon \varepsilon_0 S U^2}{2d_{1,2}^2},$$

где ε_0 — электрическая постоянная вакуума; ε — относительная диэлектрическая проницаемость среды; S — площадь электрода датчика угла;

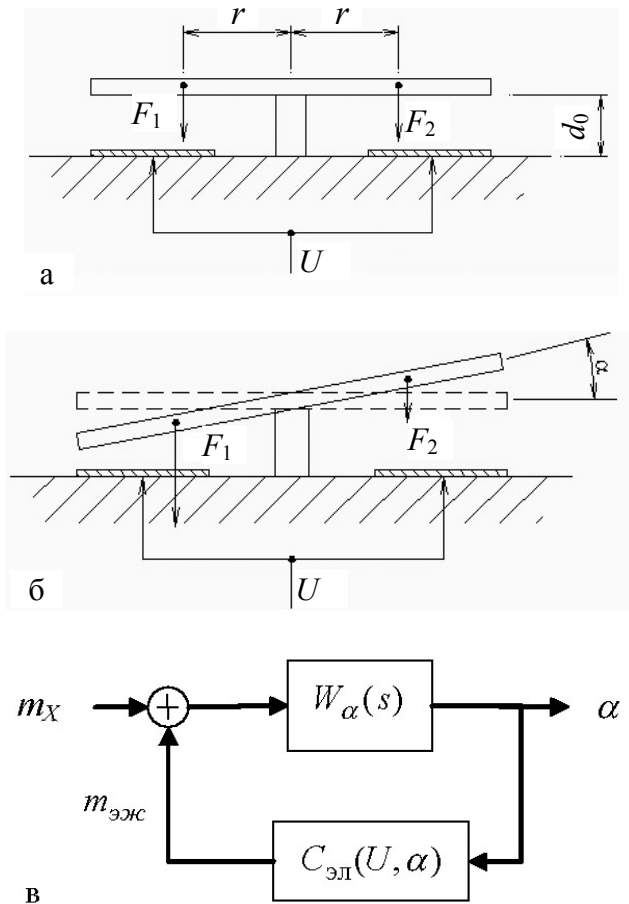


Рис. 3. К пояснению механизма электрической жесткости. а — нулевое положение ротора; б — отклонение ротора от нулевого положения; в — эквивалентная структурная схема ММГ по оси вторичных колебаний

U — подаваемое напряжение смещения; $d_{1,2}$ — зазор между ротором и подложкой. Соответственно результирующий момент $m_{эж}$, действующий по вторичной оси:

$$m_{эж} = r(F_1 - F_2) = \frac{2\epsilon\epsilon_0 r^2 S U^2 d_0 \alpha}{(d_0 - r \cdot \alpha)^2 (d_0 + r \cdot \alpha)^2} = C_{эл}(U, \alpha) \alpha, \quad (7)$$

где $C_{эл}(U, \alpha)$ — эквивалентная электрическая жесткость, зависящая от угла отклонения ротора и от напряжения; d_0 — номинальный рабочий зазор; α — угол разворота ротора по вторичной оси; U — напряжение смещения; r — расстояние до электрода.

При нулевом положении ротора (рис. 3, а) результирующий момент равен нулю. При отклонении ротора от нулевого положения (рис. 3, б), в соответствии с выражением (7), возникает момент, имеющий противоположный знак относительно момента, создаваемого жесткостью подвеса.

Введение такой отрицательной электрической жесткости эквивалентно введению позиционной обратной связи по углу колебаний α (рис. 3, в). Передаточная функция замкнутой системы $H_\alpha(s)$ (рис. 3, в) при этом имеет вид:

$$H_\alpha(s) = \frac{1/J_X}{s^2 + 2\xi_{\alpha 1} v_{\alpha 1} s + v_{\alpha 1}^2 - C_{эл}(U, \alpha)/J_X} = \frac{1/J_X}{s^2 + 2\xi_{\alpha 1} v_{\alpha 1} s + v_{\alpha 1}^2}; \quad (8)$$

$$v_{\alpha 1} = \sqrt{v_\alpha^2 - C_{эл}(U, \alpha)/J_X};$$

$$\xi_{\alpha 1} = \frac{\xi_\alpha v_\alpha}{\sqrt{v_\alpha^2 - C_{эл}(U, \alpha)/J_X}},$$

где $v_{\alpha 1}$ — собственная частота замкнутой системы, $\xi_{\alpha 1}$ — степень успокоения замкнутой системы.

Из выражения (8) следует, что, изменяя напряжение смещения U , можно снижать суммарную жесткость системы и, следовательно, собственную частоту по оси вторичных колебаний. В силу того, что частота вторичных колебаний может изменяться только в сторону ее уменьшения, данный метод известен как метод введения отрицательной электрической жесткости [3].

Применение данного метода требует, чтобы частота вторичных колебаний была больше частоты первичных, кроме того, использование функциональной зависимости $C_{эл}(U, \alpha)$ позволяет осуществить резонансную настройку только для конкретного значения угла отклонения ротора.

б. Отметим, что изменение частоты вторичных колебаний можно обеспечить также введением позиционной обратной связи по углу α . При этом для обеспечения резонансной настройки в диапазоне рабочих отклонений угла α целесообразно использовать автоматический регулятор усиления (АРУ) сигнала позиционной обратной связи.

Возможная структурная схема ММГ по оси вторичных колебаний с АРУ приведена на рис. 4. Сигнал ММГ по оси вторичных колебаний поступает на вход умножителя и на вход блока АРУ. Блок ММГ и умножитель образуют цепь единичной позиционной обратной связи. Блок АРУ, включенный параллельно цепи позиционной обратной связи, вырабатывает значение коэффициента обратной связи K_{oc} , необходимого для выполнения условия резонансной настройки (5).

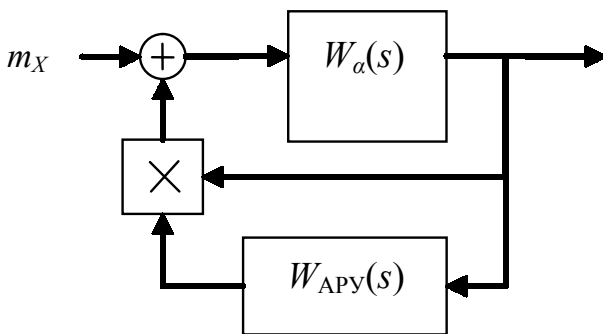


Рис. 4. Структурная схема ММГ по оси вторичных колебаний с АРУ

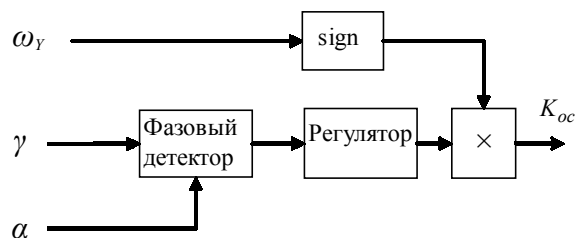


Рис. 5. Функциональная схема АРУ

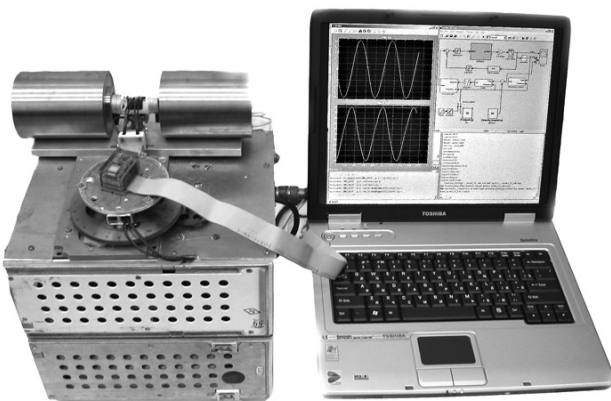


Рис. 6. Стенд угловых скоростей

Сигнал с выхода блока АРУ поступает на второй вход умножителя, формирующего сигнал управления для ММГ.

Одна из возможных функциональных схем построения АРУ приведена на рис. 5. Оценка текущей расстройки частот осуществляется фазовым детектором, на входы которого поступают сигналы о текущих значениях углов отклонения ротора

ММГ по оси первичных и вторичных колебаний. Фазовый детектор вырабатывает сигнал, пропорциональный фазовому сдвигу между сигналами на входе. Для исключения статической ошибки сигнала управления частотой выход фазового детектора подключен к входу позиционно-интегрального регулятора. Т. к. знак фазового сдвига между первичными и вторичными колебаниями определяется не только знаком частоты расстройки, но и знаком измеряемой угловой скорости, то необходимо в блок АРУ ввести информацию об измеряемой угловой скорости. В зависимости от знака текущей расстройки частот и знака измеряемой угловой скорости система реализует либо положительную, либо отрицательную позиционную обратную связь.

Предложенная система является одной из возможных схем управления частотой вторичных колебаний, обеспечивающей введение ММГ в резонансный режим и выполнение равенства $v_\alpha = v_\gamma$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью исследования режима функционирования ММГ с совмещенными частотами были проведены стендовые лабораторные испытания. Исследования состояли в оценке параметров датчика, достижимых при его работе в режиме совмещенных и разнесенных частот. Разнесение частот при этом составляло ориентировочно 200 Гц. Для работы датчика в режиме совмещенных частот перед проведением испытаний было подобрано требуемое значение напряжения смещения U .

Оценки коэффициентов преобразования и полосы пропускания ММГ были получены с помощью стенда задания переменных угловых скоростей (рис. 6). С помощью стенда задавалась одинаковая амплитуда угловой скорости на каждой частоте в проверяемом диапазоне (40 Гц). При этом регистрировались показания ММГ. По результатам измерения были построены амплитудно-частотные характеристики, приведенные на рис. 7. Полоса пропускания оценивалась по спаду уровня АЧХ на -3 дБ. Значения коэффициентов преобразования получены как отношения амплитуд показаний ММГ к заданной стендом амплитуде угловой скорости при частоте 5 Гц.

Оценка шумов в результатах измерений ММГ в обоих случаях проводилась на неподвижном основании. Характеристики гироскопа, полученные в результате проведенных испытаний, приведены в таблице, графики АЧХ — на рис. 7.

Из таблицы и рисунка видно, что совмещение частот первичных и вторичных колебаний позволило улучшить масштабный коэффициент в 4.5 раза, а соотношение "сигнал-шум" в 2 раза при сохранении требуемой полосы пропускания ММГ

Характеристики ММГ

Параметр	Совмещенные частоты	Разнесенные частоты
Коэффициент преобразования, мВ/(град/с)	1.85	0.42
Шумовые характеристики, мВ/Гц ^{1/2} (град/с/Гц ^{1/2})	0.057 (0.031)	0.024 (0.057)
Соотношение "сигнал-шум"	32.5	17.5
Полоса пропускания, Гц	~40	~40

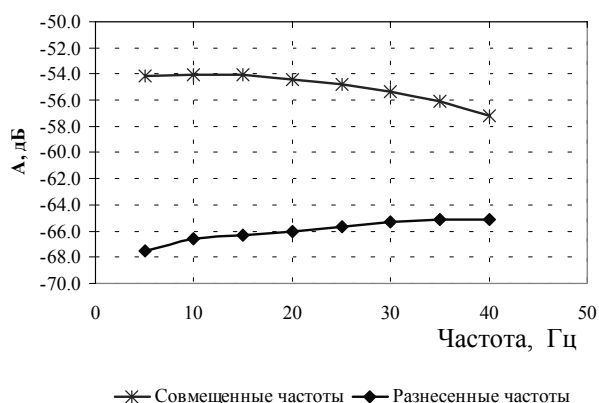


Рис. 7. АЧХ ММГ в режиме разнесенных и совмещенных частот

в 40 Гц. При этом нелинейность характеристики осталась прежней.

ВЫВОДЫ

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Теоретические исследования режимов функционирования гироскопа с разнесенными и совмещенными частотами показывают преимущества последнего из них.

2. Предложенные технические решения позволяют реализовать этот режим работы в гироскопе, разрабатываемом в ЦНИИ "Электроприбор".

3. Результаты экспериментальных исследований подтверждают теоретические предпосылки, при этом соотношение "сигнал-шум" возрастает почти в два раза.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ 06-08-01610.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. Тула: Гриф и К, 2004.
2. Пешехонов В.Г., Несенюк Л.П., Кучерков С.Г. и др. Результаты разработки микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2004. Т. 47, № 4. С. 65.
3. Кучерков С.Г., Шадрин Ю.В. К вопросу о выборе конструктивных параметров микромеханического кольцевого вибрационного гироскопа // Навигация и управление движением. Сб. докл. III Науч.-техн. конф. молодых ученых. СПб., 2001. С. 94-101.

ФГУП ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург

Материал поступил в редакцию 21.11.2006.

INVESTIGATION OF OPERATION MODES OF MICROMECHANICAL GYROSCOPE WITH SUPERIMPOSED FREQUENCIES ALONG THE PRIMARY AND SECONDARY OSCILLATION AXES

A. S. Kovalev, D. G. Gryazin, Yu. V. Shadrin, D. I. Lychev

Federal State Unitary Company Central Research Institute "Elektropribor", Saint-Petersburg

The paper considers operation modes of the micromechanical gyroscope (MMG) of the R-R type with superimposed and separated frequencies of primary and secondary oscillations. Methods for oscillation frequency superposition are analyzed. Theoretical investigations demonstrating advantages of the superimposed frequency operating mode are represented. Experimental results of MMG operation in the superimposed and separated frequency modes are given. The experimental results have confirmed the theoretical ideas.