

УДК 531.383

© Д. Г. Грязин, В. О. Евсеев

СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

Рассматриваются вопросы проектирования устройства, позволяющего воспроизводить гармонические угловые скорости. Анализируются возможные технические решения. Предложена схема построения стенда на основе электромагнитных силовых элементов с преобразованием линейных колебаний в угловые при помощи кинематической связи. Приводится анализ возможных схем управления таким устройством. Исследуется один из режимов функционирования стенда, описывается его математическая модель. Точность модели оценена путем сопоставления расчетных характеристик с полученными экспериментальными данными.

Кл. сл.: микромеханический гироскоп, стенд, угловая скорость, амплитудно-частотная характеристика.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее динамично развивающихся в мире направлений микросистемной техники является создание микромеханических гироскопов (ММГ). Очевидно, что исследования их характеристик на различных этапах разработки, сертификации и проведения приемочных испытаний может быть выполнено только с помощью специальных стендов. Для оценки амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) ММГ, представляющих собой датчики угловых скоростей, необходимо оборудование, позволяющее воспроизводить угловые скорости по заданному гармоническому закону.

Отечественная промышленность не выпускает таких изделий, а зарубежные стенды не имеют подобных штатных режимов функционирования. Как правило, они предназначены лишь для задания угловых скоростей платформы, на которой установлены испытываемые датчики, как, например, стенды фирмы Acutronic [1].

Отметим, что отсутствие указанных штатных режимов функционирования в документации на стенды обусловлено особенностями конструкции их платформы. В случае эксплуатации таких стендов в режиме воспроизведения угловых колебаний будет происходить активный износ колец подшипников в зонах их контакта с шариками, что повлияет на точностные характеристики стендов. Кроме того, будет иметь место интенсивный износ токоподводов в областях контакта со щетками.

Отсутствие возможности закупки подобного испытательного оборудования определяет и актуальность работ в этом направлении.

Так, в МГТУ им. Н.Э. Баумана в течение ряда лет разрабатывался стенд для динамических испытаний роторных вибрационных гироскопов (РВГ) [2]. Он позволяет осуществлять движение стола,

на котором устанавливается испытуемый датчик, как с постоянной угловой скоростью, так и в колебательном режиме с регулируемой частотой и амплитудой колебаний. Стенд представляет собой одноосный индикаторный гиросtabilизатор с волоконно-оптическим датчиком угловой скорости в качестве чувствительного элемента. Управление работой стенда осуществляется от персонального компьютера, на который поступает информация о скорости вращения стола стенда, а также выходной сигнал испытуемого датчика. Диапазон изменения постоянной угловой скорости вращения стола стенда ± 300 град/с, полоса частот задаваемых синусоидальных угловых скоростей — 7 Гц, максимальная достигаемая амплитуда синусоидальной угловой скорости на частоте 7 Гц — 50 град/с. Очевидно, что такой полосы частот недостаточно для целей оценки частотных характеристик ММГ. К тому же стенд обладает особенностями, отмеченными выше.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

К числу основных технических требований, предъявляемых к проектируемому стенду относятся:

- воспроизведение угловых скоростей, изменяющихся по синусоидальному закону;
- полоса частот задаваемых угловых скоростей 10–50 Гц;
- амплитуда воспроизводимых угловых скоростей не менее 50 град/с;
- точность задания амплитуды угловых скоростей не хуже ± 3 град/с.

Указанные требования могут быть реализованы в случае применения следующих схем построения стенда.

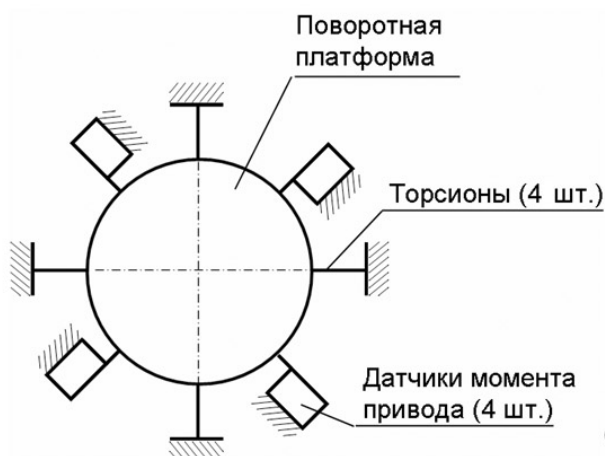


Рис. 1. Схема построения стэнда для выработки непосредственно угловых колебаний платформы

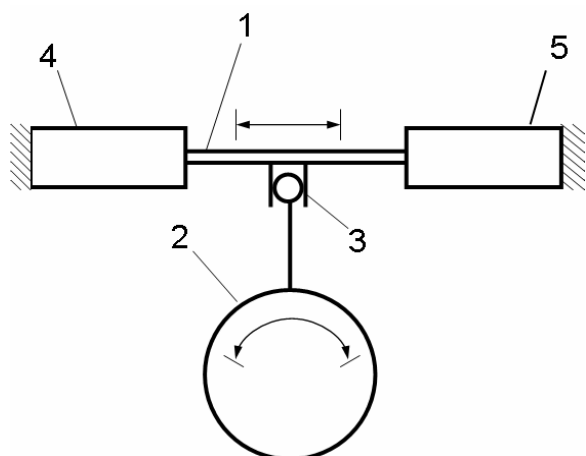


Рис. 2. Схема построения стэнда для воспроизведения линейных колебаний якоря, с их дальнейшим преобразованием в угловые колебания платформы.

1 — якорь; 2 — поворотная платформа; 3 — шарнир; 4 — электромагнитный силовой элемент, возбуждающий колебания якоря; 5 — электромагнитный силовой элемент, реализующий электрическую пружину

— Установка датчиков момента непосредственно по образующей поворотной платформы (рис. 1). В качестве датчиков момента привода могут использоваться пьезоэлектрические или электромагнитные силовые элементы.

— Воспроизведение линейных колебаний якоря, с их дальнейшим преобразованием в угловые колебания с помощью кинематической связи с платформой (рис. 2).

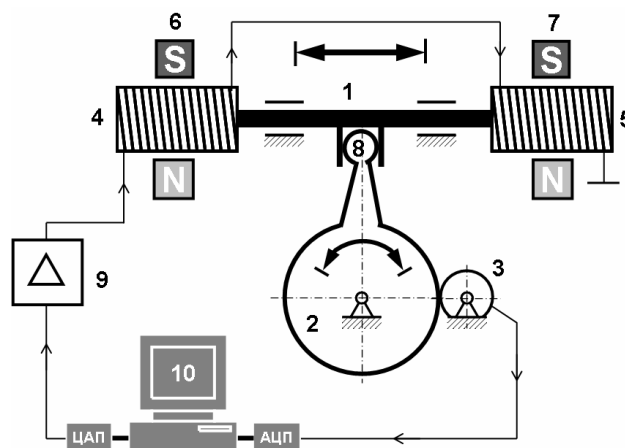


Рис. 3. Функциональная схема стэнда, работающего в нерезонансном режиме.

1 — якорь; 2 — поворотная платформа; 3 — датчик угла; 4, 5 — катушки якоря; 6, 7 — постоянные электромагниты; 8 — безлюфтовый шарнир; 9 — усилитель мощности; 10 — компьютер

К недостаткам предложенных схем следует отнести их эффективную работу только в дорезонансном режиме. Очевидно, что значительный момент инерции поворотной платформы (рис. 1) вместе с жесткостью подвеса будут определять собственную частоту колебаний системы. В связи с тем что система, построенная по схеме рис. 2, имеет электрическую, а не механическую пружину, ее схема является более предпочтительной при реализации широкодиапазонного стэнда. Следует отметить и то, что увеличение жесткости потребует значительных затрат энергии.

ОСОБЕННОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА

Схема предложенного стэнда представлена на рис. 3 [3]. В ее основу положен принцип работы линейного вибратора, в котором колебания якоря 1 возбуждаются с помощью катушек с переменным током 4 и 5, находящихся в постоянном магнитном поле, создаваемом электромагнитами 6 и 7. Для преобразования возвратно-поступательного движения якоря 1 в угловое движение поворотной платформы 2 применяется безлюфтовый шарнир 8.

Управление стэндом должно производиться с помощью компьютера 10, оснащенного 16-разрядной платой ЦАП—АЦП. Алгоритм управления может быть реализован в среде программного продукта Simulink, работающего в режиме реального времени на частоте дискретизации 1667 Гц.

Схема управления стэнда может быть реализована двумя путями. В первом случае стэнд работает

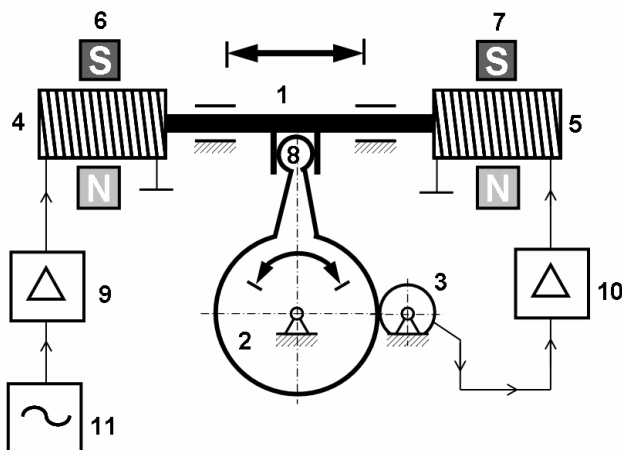


Рис. 4. Функциональная схема стенда, работающего в резонансном режиме.

1 — якорь; 2 — поворотная платформа; 3 — датчик угла; 4, 5 — катушки якоря; 6, 7 — постоянные электромагниты; 8 — безлюфтовый шарнир; 9, 10 — усилители мощности; 11 — генератор гармонических колебаний

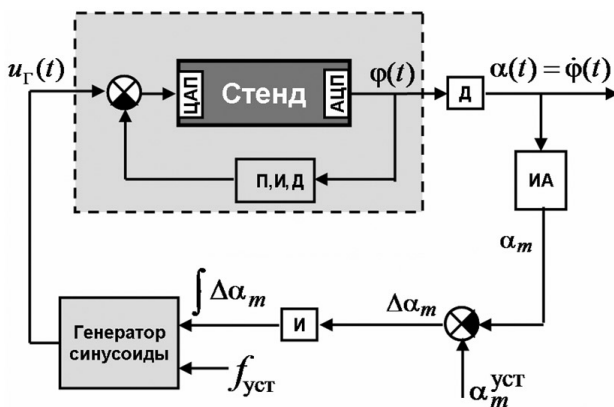


Рис. 5. Блок-схема системы управления стенда

в нерезонансном режиме. Для этого (рис. 3) колебания якоря 1 возбуждаются сигналом системы управления, подающимся через ЦАП и усилитель 9 на катушки 4, 5, и передаются на платформу 2 через шарнир 8. Информация об угловом положении платформы 2 поступает от датчика угла поворота 3, выполненного на основе вращающегося трансформатора (ВТ), и с помощью АЦП вводится в систему управления.

В том случае, если подать на катушку 4 сигнал с генератора 11 (рис. 4), а датчик угла 3 через усилитель 10 соединить с катушкой 5, то можно реализовать резонансный режим работы стенда [5]. В то же время недостатком такой схемы является

сложность перенастройки с одной резонансной частоты на другую. Это связано с тем, что коэффициент усиления усилителя 10 должен регулироваться при настройке режима вручную, а при перенастройке стенда на другую частоту эта операция должна повторяться.

Устранение этого недостатка возможно путем сопряжения стенда с персональным компьютером через плату ЦАП—АЦП. При этом частота и амплитуда задаваемых колебаний будут изменяться программно.

Блок-схема предложенной системы управления, реализованной программно-аппаратными средствами, представлена на рис. 5, где буквенными индексами обозначены звенья: П — пропорциональное, И — интегрирующее, Д — дифференцирующее, ИА — измерение амплитуды. Система позволяет устанавливать частоту $f_{уст}$ и амплитуду

$\alpha_m^{уст}$ воспроизводимых синусоидальных колебаний платформы и включает два контура обратной связи: по углу φ и по амплитуде угловой скорости α_m , а также имеет генератор синусоидальной волны, реализуемый также программно.

Обратная связь по углу обеспечивает воспроизведение стендом синусоидальной угловой скорости. Это достигается путем введения в этот контур регулятора со звеньями П, И, Д, параметры которого подобраны из условия, чтобы воспроизводимая угловая скорость содержала только одну гармонику на установленной частоте $f_{уст}$. Регулятор также позволяет удерживать колебания платформы около некоторого среднего положения, исключая его дрейф, который наблюдался при отсутствии обратной связи.

Контур обратной связи по амплитуде угловой скорости обеспечивает воспроизведение угловой скорости установленной амплитуды $\alpha_m^{уст}$ и стабилизацию этого значения на заданном уровне.

Таким образом, разработанная система управления обеспечивает воспроизведение стендом угловых скоростей, изменяющихся по синусоидальному закону, при этом реализована возможность оперативно изменять частоту и амплитуду воспроизводимой угловой скорости, а также обеспечивается стабилизация амплитуды на установленном значении.

Предложенная схема работы реализована в конструкции, представленной в [3].

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СТЕНДА

Входным сигналом стенда (см. рис. 6) является напряжение $u(t)$, задаваемое в системе управления и формируемое с помощью ЦАП. Выходным



Рис. 6. Общая функциональная схема стенда

сигналом стенда является угол поворота платформы $\varphi(t)$, формируемый датчиком угла и вводимый в систему управления с помощью АЦП.

С целью определения характера зависимости между входным $u(t)$ и выходным $\varphi(t)$ сигналами было проведено экспериментальное исследование амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) стенда. На вход последовательно подавались синусоидальные сигналы с одинаковыми амплитудами и разными частотами, охватывающими рабочий диапазон стенда:

$$u_i(t) = u_m \sin(2\pi f_i t), \quad (1)$$

где u_m — амплитуда, $u_m = 4$ В, f_i — частота в i -м эксперименте ($f_i = 10, 15, \dots, 50$ Гц, $i = 1, 2, \dots, 9$).

Было отмечено, что в установившемся режиме выходной сигнал $\varphi_i(t)$ имеет в своем спектре ярко выраженный пик на частоте входного сигнала f_i , т. е. он содержит только одну гармонику на частоте f_i . Это означает, что на выходе стенда в установившемся режиме также имеют место синусоидальные колебания и той же частоты, что и на входе, что является свойством линейных динамических систем [6], описываемых линейными дифференциальными уравнениями. Так, ограничиваясь уравнениями второго порядка, математическая модель функционирования стенда может быть описана уравнением [3]

$$J\ddot{\varphi} + h\dot{\varphi} + c\varphi = M_{пр}, \quad (2)$$

коэффициенты в котором имеют следующий физический смысл: J — момент инерции масс, приведенных к оси вращения поворотной платформы, или приведенный момент инерции механической системы стенда, [кг·м²]; h — приведенный момент демпфирования, [кг·м²/с]; c — приведенный момент жесткости, [кг·м²/с²]; $M_{пр}$ — момент привода системы, [Н·м], при этом для простоты предполагается, что он линейно зависит от входного сигнала, т. е. $M_{пр}(t) = K \cdot u(t)$, где K —

коэффициент пропорциональности, [Н·м/В]; $u(t)$ — входное напряжение, [В].

Численное значение приведенного момента инерции J было получено расчетным путем и составило 0.005 кг·м². Значения остальных параметров модели стенда, т. е. h , c , K , были определены посредством сопоставления экспериментальной и расчетной амплитудно-частотных характеристик стенда.

Выражение для АЧХ линейной динамической системы, описываемой уравнением (2), которое может быть принято в качестве расчетной АЧХ стенда, имеет вид [6]

$$A(f) = \frac{K}{\sqrt{(J(2\pi f)^2 - c)^2 + h^2(2\pi f)^2}}. \quad (3)$$

Экспериментальная АЧХ стенда была получена путем измерения амплитуды φ_{m_i} выходного сигнала стенда $\varphi_i(t)$ в установившемся режиме при подаче на вход синусоидального сигнала (1) с частотой f_i и амплитудой u_m и, таким образом, представляет собой массив численных значений

$$A_i^{\text{экспер}} = \varphi_{m_i} / u_m, \quad i = \overline{1, 9}. \quad (4)$$

Для решения задачи идентификации необходимо отыскать такие значения параметров h , c и K , которые бы при их подстановке в выражение для расчетной АЧХ (3) минимизировали ее отличие от экспериментальной (4), т. е. необходимо найти оптимальное решение следующей избыточной системы нелинейных уравнений относительно h , c и K :

$$A(f_i) = A_i^{\text{экспер}}, \quad i = \overline{1, 9}, \quad (5)$$

где $A(f_i)$ определяется выражением (3).

Для решения этой задачи была разработана специальная программа в среде Mathcad, в которой автоматизирован подбор параметров модели. В результате были получены численные значения $h = 0.02$, $c = 0.001$ и $K = 11.4$. Численное значение $J = 0.005$, полученное в результате расчета механической системы, корректировалось в ходе подбора. При этом было отмечено, что даже небольшое отклонение его значения от расчетного приводит к значительному смещению расчетной кривой относительно экспериментальной, т. е. рассчитанное значение J можно считать достаточно точным. Отметим также, что подбор остальных параметров значительно упрощается при наличии точного значения J .

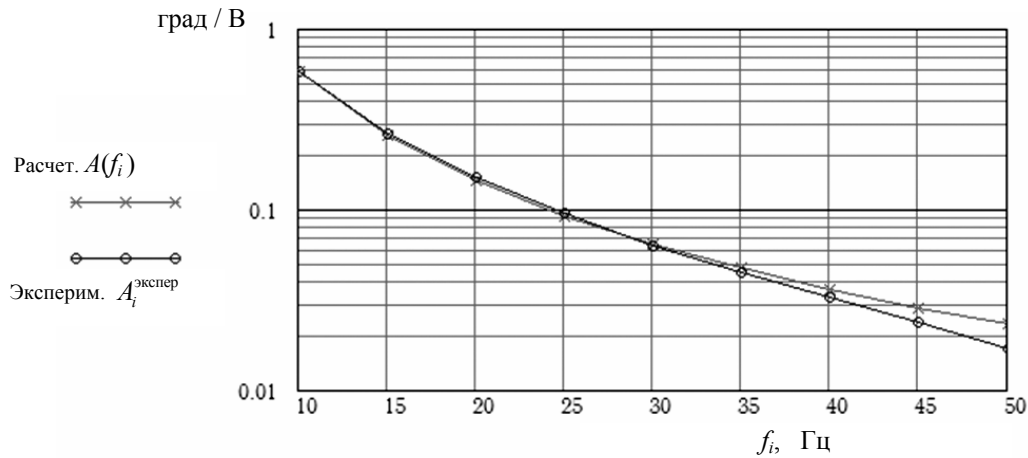


Рис. 7. Расчетная и экспериментальная амплитудно-частотные характеристики стэнда

Графики экспериментальной и расчетной АЧХ представлены на рис. 7. Поскольку расположены они достаточно близко друг к другу, в программе также выводится различие между ними в процентном отношении

$$\delta A_i = \frac{|A(f_i) - A_i^{\text{экспер}}|}{A_i^{\text{экспер}}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

которое составляет от 0.2 до 5 % в диапазоне частот от 10 до 35 Гц, далее оно растет с 5 до 36 % на частотах от 35 до 50 Гц. Эти значения можно рассматривать как меру точности полученной модели.

Таким образом, в результате моделирования работы стэнда отличие расчетной амплитудно-частотной характеристики от экспериментальной не превышает 5 % в диапазоне частот 10–35 Гц. Полученные результаты говорят о том, что функционирование устройства может быть достаточно хорошо описано предложенной линейной моделью в указанном диапазоне частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный стэнд позволяет оценивать частотные характеристики ММГ, при этом по сравнению с аналогами обеспечивается более широкая полоса частот воспроизводимых гармонических угловых скоростей. Рабочая полоса частот стэнда составляет 5–55 Гц [3]. В этой полосе частот он позволяет воспроизводить гармонические угловые скорости с амплитудой не менее 50 град/с, при этом максимальная амплитуда в 200 град/с достигается на частоте 20 Гц, коэффициент гармонических искажений составляет не более 10 %, точ-

ность задания амплитуды угловой скорости — не хуже ± 3 град/с.

Реализация алгоритма управления стэндом на базе компьютера придает системе гибкость и позволяет автоматизировать процесс определения частотных характеристик испытуемых объектов. Динамические свойства стэнда могут быть достаточно хорошо описаны линейной моделью, что в свою очередь позволяет ее применять при дальнейшем совершенствовании схемы устройства.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 08-08-00060.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. (URL: <http://www.acutronic.com>).
2. Коновалов С.Ф. и др. Вибрационные датчики угловой скорости // Гироскопия и навигация. 2004. Т. 44, № 1. С. 107–118.
3. Бердюгин А.В., Лычев Д.И. Стэнд для оценки частотных характеристик малогабаритных датчиков угловых скоростей // Материалы VIII конференции молодых ученых "Навигация и управление движением". СПб.: "Электронприбор", 2007. С. 107–112.
4. (www.ideal-aerosmith.com).
5. Грязин Д.Г., Лычев Д.И., Бердюгин А.В. Стэнд для воспроизведения угловых скоростей. Пат. РФ № 2006115534/28 // Бюл. № 26. 20.09.07. 4 с.
6. Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). Определения, теоремы, формулы. 6-е изд., стер. СПб.: Изд.-во "Лань", 2003. 831 с.

ФГУП ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург

Материал поступил в редакцию 10.10.2008.

A DEVICE FOR FREQUENCY CHARACTERISTICS CONTROL OF MICROMECHANICAL GIROSCOPE

D. G. Gryazin, V. O. Yevseyev

Federal State Unitary Enterprise — Central Scientific and Research Institute "Elektroprigor", Saint-Petersburg

The paper considers design problem of a device for harmonic angular velocities simulation. Possible engineering solutions are analyzed. A scheme based on electromagnetic linear drives with transformation of linear oscillations to angular is proposed. Possible control schemes are analyzed. One of the operation modes is studied and described using mathematical modeling. Accuracy of the model is estimated by comparison of simulated and experimental characteristics.

Keywords: micromechanical gyroscope, test bench (stand), angular velocity, amplitude-frequency characteristic.