

Д. Г. ГРЯЗИН, А. И. СКАЛОН, А. С. КОВАЛЕВ, Д. И. ЛЫЧЕВ

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНООСНОГО СТЕНДА ПЕРЕМЕННЫХ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ

Рассматривается методика оценивания метрологических характеристик стенда для воспроизведения переменных угловых скоростей, предназначенного для исследования динамических характеристик ММГ. Предложена методика с использованием двух линейных акселерометров. Проведен анализ погрешностей предложенной методики.

Постановка задачи

В ходе разработки микромеханического датчика угловых скоростей (ДУС) возникла необходимость экспериментальной проверки эксплуатационных параметров образцов. Одной из важнейших характеристик любого датчика является его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазо-частотная характеристика (ФЧХ). Знание частотных характеристик позволяет определить полосу пропускания и динамические характеристики ДУС.

Для экспериментального определения АЧХ и ФЧХ опытных образцов микромеханических ДУС требуется устройство, воспроизводящее гармонические угловые скорости. Требования к этому устройству:

- полоса частот задаваемых угловых скоростей: 10-50 Гц;
- амплитуда угловых скоростей: не менее 50°/с;
- коэффициент гармонических искажений: не более 10 %;
- точность задания амплитуды угловых скоростей: не хуже $\pm 3\%$.

Указанные требования легли в основу созданного стенда, реализующего принцип работы электромагнитного линейного вибратора, широко применяющийся в устройствах для виброиспытаний. Колебания вибратора возбуждаются при прохождении переменного тока через катушку, находящуюся в постоянном магнитном поле. Для преобразования возвратно-поступательного движения катушки в угловое движение поворотной платформы применен безлюфтовый шарнир. Выбор данной схемы обусловлен наименьшей трудоемкостью и простотой ее воплощения.

Схема и общий вид стенда для задания угловых скоростей представлена на рис. 1, где 1 – поворотная платформа; 2 – шарнир; 3 – якорь; 4 – катушки якоря; 5 – постоянные магниты; 6 – датчик угла; 7 – усилитель мощности; 8 – компью-

Грязин Дмитрий Геннадиевич. Доктор технических наук, главный метролог-начальник отдела ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Скалон Анатолий Иванович. Доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Действительный член Академии навигации и управления движением.

Ковалев Андрей Сергеевич. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Член секции молодых ученых Академии навигации и управления движением.

Лычев Дмитрий Игоревич. Инженер 1 категории ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

тер; 9 – испытуемый объект. На базе компьютера 8, оснащенного платой ЦАП-АЦП, реализована система управления работой стенда в среде программного продукта Matlab, работающая в реальном режиме времени на частоте 1666 Гц.

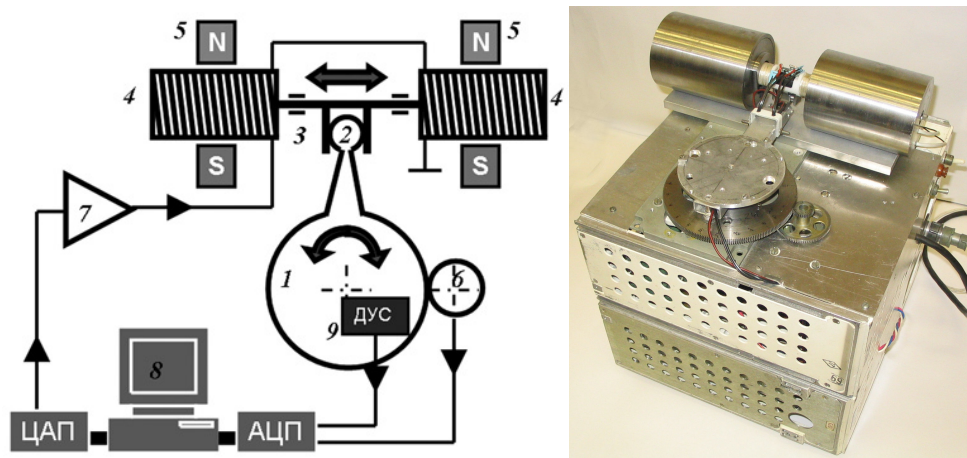


Рис. 1. Структурная схема и общий вид испытательного стенда.

Принцип работы стенда заключается в том, что колебания возбуждаются сигналом системы управления стендом, подающимся через ЦАП и усилитель 7 на катушки 4, и передаются с якоря 3 на платформу 1 через безлюфтовый шарнир 2. Информация об угловом положении платформы 1 поступает от датчика угла поворота 6, выполненного на основе линейного вращающегося трансформатора, и с помощью АЦП вводится в систему управления стендом.

Макетирование работы устройства

Механическую систему стенда можно описать дифференциальным уравнением следующего вида:

$$J \cdot \ddot{\alpha} + h \cdot \dot{\alpha} + c \cdot \alpha = M_{\text{пр}}(t) \quad , \quad (1)$$

где α – угол поворота платформы 1; J – приведенный момент инерции; h – приведенный коэффициент демпфирования; c – приведенная жесткость; $M_{\text{пр}}(t)$ – момент привода системы.

Ориентировочное значение момента привода системы $M_{\text{пр}}(t)$ может быть определено исходя из заданной угловой скорости $\dot{\alpha}$ на частоте f при известном моменте инерции системы J , как:

$$M_{\text{пр}}(t) \cong 2 \cdot \pi \cdot f \cdot J \cdot \dot{\alpha} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad . \quad (2)$$

Параметры магнитной системы стенда можно рассчитать, руководствуясь конструктивными соображениями, законами Ампера и геометрией магнитной цепи [1, 2]:

$$M_{\text{пр}}(t) = \frac{4 \cdot \pi \cdot N \cdot I}{\frac{l_1}{S \cdot \mu} + \frac{l_0}{S_0}} \cdot l \cdot r \cdot i(t) \quad , \quad (3)$$

где N – количество витков катушек постоянных магнитов 5; I – ток катушек постоянных магнитов; l – длина провода катушек 4, находящаяся в рабочем зазоре магнитной системы; $i(t)$ – ток в обмотке катушек 4; r – расстояние от оси вращения платформы 1 до шарнира 2; l_1 – длина сердечника постоянного магнита, S – площадь его поперечного сечения, μ – его магнитная проницаемость; l_0 – ширина рабочего зазора магнитной системы, S_0 – площадь его сечения.

На основании расчетов, проведенных по соотношениям (2) и (3), была разработана конструкция привода стенда и изготовлен опытный образец.

Система управления (СУ) стендом была создана с использованием метода параметрического синтеза и отлажена на стенде. В результате была получена СУ [1], охваченная двумя контурами обратной связи (ОС): 1) ОС по углу α ; 2) ОС по амплитуде угловой скорости $\dot{\alpha}$. Схема СУ представлена на рис.2, где обозначены следующие звенья: ПИД – цифровой пропорциональный интегрально-дифференцирующий регулятор, ИА – изм-

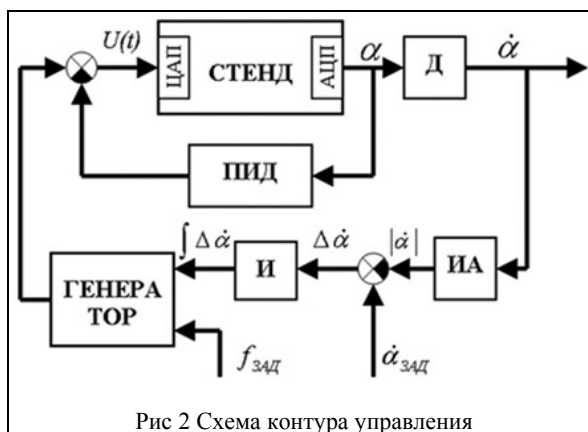


Рис 2 Схема контура управления

Система управления стендом позволяет устанавливать необходимую частоту $f_{\text{з.ад}}$ и амплитуду $\dot{\alpha}_{\text{з.ад}}$ воспроизводимой угловой скорости, а также стабилизирует амплитуду на заданном значении.

Определение характеристик стенда

Работа стенда была исследована с целью определения его характеристик, к которым относятся:

- область рабочих частот;
- коэффициент нелинейных искажений;
- погрешность задания амплитуды угловых скоростей.

Под областью рабочих частот стенда понимается диапазон частот, в котором амплитуда задаваемой угловой скорости удовлетворяет заданным требованиям при определенных начальных условиях. Под начальными условиями в данном случае следует понимать силу тока в катушках постоянных магнитов, определяющую величину магнитной индукции в рабочем зазоре системы, максимальную амплитуду угловых перемещений поворотной платформы, связанную с ограничением угла поворота датчика положения, а также максимальную амплитуду напряжения, подаваемого на катушки якоря с усилителя мощности. В ходе экспериментальных исследований были определены АЧХ стенда при заданной силе тока I в каждой катушке постоянных магнитов.

Результат определения области рабочих частот стенда изображены на рис. 3.

Как видно из приведенного графика, при силе тока постоянных магнитов равной $I = 1A$, область рабочих частот стэнда находится в полосе от 5 до 55 Гц, а при силе тока постоянных магнитов равной $I=2A$ – от 5 до 72 Гц. Можно утверждать, что созданный опытный образец стэнда обеспечивает задание гармо-

нических угловых скоростей в полосе частот от 5 до 55 Гц с амплитудой не менее 50 град/с.

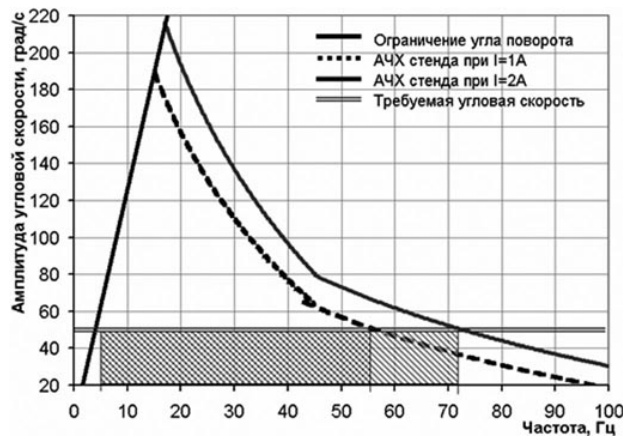


Рис. 3. Область рабочих частот стенда

Отклонение формы изменения угловой скорости, воспроизводимой стендом, от синусоидальной оценивается величиной коэффициента нелинейных искажений. Искаженный сигнал содержит в своем спектре полезную составляющую – первую гармонику (основная частота f), а также высшие гармоники (частоты $2f$, $3f$ и т.д.) и шумовые составляющие (в первую очередь связанные с цепями питания).

Оценка точностных характеристик стенда с помощью акселерометров

Для оценивания метрологических характеристик стенда была разработана методика измерений, основанная на использовании двух линейных акселерометров, установленных на платформе стенда на некотором радиусе от оси вращения платформы таким образом, чтобы оси чувствительности акселерометров лежали в горизонтальной плоскости и были перпендикулярны радиусу платформы. При этом величина скорости движения платформы определялась путем интегрирования полученных значений ускорений.

Испытания проводились с использованием виброакселерометров типа 4321 (фирма «Брюль и Кьер»).

Для работы стенда были созданы программа управления и программа записи выходных сигналов в файл и на компьютере установлен пакет программ MatLab 6.5 с модулями Real-Time Workshop и Simulink и один из списка совместимых компиляторов Matlab 6.5, например Visual C++ 6.0.

С помощью программы управления стендом задавалась амплитуда воспроизводимой угловой скорости $50^\circ/\text{с}$ и последовательность частот от 10 Гц до 50 Гц с шагом 10 Гц. На каждой частоте фиксировались в файл величины выходных сигналов акселерометров в течение 10 периодов колебаний.

Процедура оценки метрологических характеристик стенда потребовала проведения анализа погрешностей методики выполнения измерений. При этом рассматривались три вида погрешностей:

а) смещение оси, на которой установлены акселерометры, от центра вращения (рис. 4);

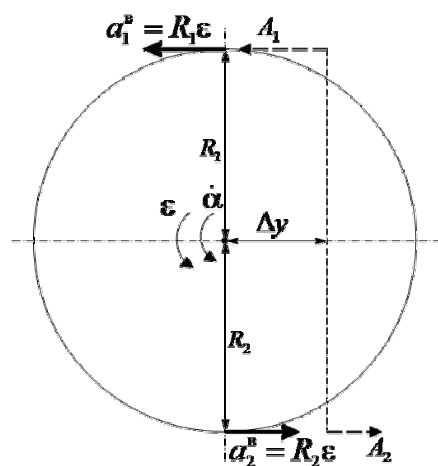


Рис. 4.

б) отклонение направления осей чувствительности акселерометров от касательной к траектории движения (рис. 5);

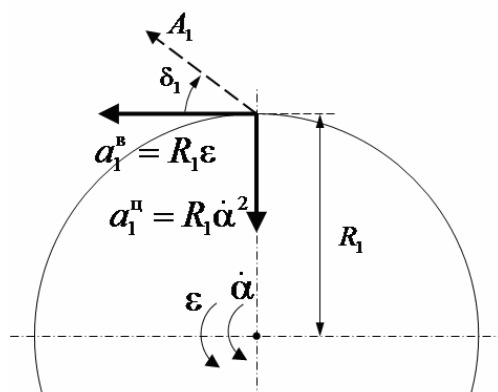


Рис. 5.

в) отклонение отстояния осей чувствительности акселерометров от оси вращения платформы (рис. 6).

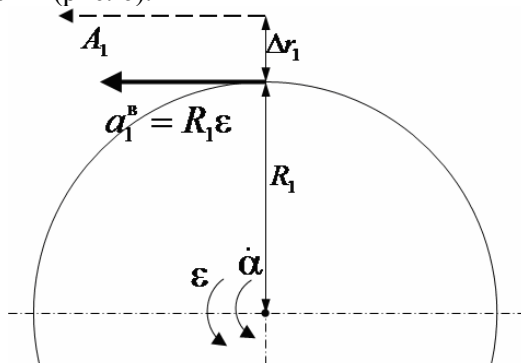


Рис. 6.

На рисунках введены следующие обозначения: $\dot{\alpha}$ – угловая скорость движения поворотной платформы, ε – угловое ускорение, R_1, R_2 – расстояния от оси вращения до каждого из акселерометров в случае их идеального расположения, a_1^B, a_2^B – истинные значения тангенциальных составляющих ускорения, подлежащие измерению, Δy – отклонение оси, на которой лежат акселерометры, от идеального расположения, A_1, A_2 – измеряемые значения ускорений.

В этом случае отличие измеряемого ускорения A_1 от истинного a_1^B определяется выражением:

$$\Delta a_1 = A_1 - a_1^B = (\dot{\alpha})^2 \Delta y, \quad (4)$$

Очевидно, что для второго акселерометра значение погрешности будет таким же по величине и противоположным по знаку.

При этом при подстановке вместо A_1 и A_2 истинных значений вращательного ускорения a_1^B и a_2^B получим истинное (действительное) текущее значение угловой скорости, обозначаемое $\dot{\alpha}(t)$:

$$\dot{\alpha}(t) = \frac{1}{R_1 + R_2} \int_0^t (a_1^B(\tau) + a_2^B(\tau)) d\tau, \quad (5)$$

В случае отклонения оси чувствительности акселерометров от касательной к траектории движения платформы стенда возникает погрешность, вызываемая проекцией центростремительного ускорения a_1^n на ось чувствительности акселерометра, развернутую на угол δ_1 .

В данном случае измеряемое ускорение A_1 будет определяться выражением:

$$A_1 = a_1^B \cos \delta_1 + a_1^n \sin \delta_1, \quad (6)$$

где отклонение δ_1 необходимо брать с учетом знака. Так, для отклонения δ_1 против часовой стрелки, как показано на рисунке 3, оно берется со знаком «минус».

Выражение (6) представляет собой проекцию векторной суммы ускорений a_1^B и a_1^n на ось A_1 . Очевидно, что для случая второго акселерометра приведенное выражение будет аналогичным.

Третьей составляющей погрешности рассматриваемой методики является отклонение отстояния осей чувствительности акселерометров от оси вращения платформы. На рисунке показано смещение Δr_1 оси акселерометра относительно заданного расстояния до центра вращения платформы.

Очевидно, что отличие измеренного ускорения A_1 от истинного a_1^B равно:

$$\Delta a_1 = A_1 - a_1^B = \varepsilon \Delta r_1, \quad (7)$$

а относительная погрешность измерения ускорения, вызванная указанным отклонением равна

$$\delta a_1 = \frac{\Delta r_1}{R_1} \cdot 100\% . \quad (8)$$

Таким образом, полученные выражения (5)...(8) позволяют провести оценки погрешностей определения угловой скорости движения платформы стенда.

Величина угловой скорости рассчитывается по формуле

$$\dot{\alpha}_{расч}(t) = \frac{1}{R_1 + R_2} \int_0^t (A_1(\tau) + A_2(\tau)) d\tau , \quad (9)$$

При этом при подстановке вместо A_1 и A_2 истинных значений вращательного ускорения a_1^B и a_2^B действительное текущее значение угловой скорости определяется как

$$\dot{\alpha}(t) = \frac{1}{R_1 + R_2} \int_0^t (a_1^B(\tau) + a_2^B(\tau)) d\tau , \quad (10)$$

Погрешность измерения ускорения, вызванная смещением оси, на которой лежат акселерометры, на величину Δy , не вносит погрешности в значение угловой скорости, поскольку:

$$\alpha_{расч}(t) = \frac{1}{R_1 + R_2} \int_0^t (a_1^B(\tau) + \dot{\alpha}(\tau)^2 \Delta y + a_2^B(\tau) - \dot{\alpha}(\tau)^2 \Delta y) d\tau , \quad (11)$$

где $\dot{\alpha}(\tau)$ – действительное значение угловой скорости. Очевидно, что погрешности измерения ускорений, вызванные указанным смещением, т. е. $+\dot{\alpha}(\tau)^2 \Delta y$ и $-\dot{\alpha}(\tau)^2 \Delta y$, равны по величине и противоположны по знаку.

Для расчета угловой скорости при наличии отклонения направления осей чувствительности акселерометров от касательной к траектории движения платформы получено соотношение

$$\dot{\alpha}_{расч}(t) = \cos \delta \frac{1}{2R} \int_0^t (a_1^B(\tau) + a_2^B(\tau)) d\tau + \sin \delta \cdot \dot{\alpha}_m^2 t \quad (12)$$

Выражение (12) получено при допущении, что величина отклонения для обоих акселерометров одинакова ($\delta_1 = \delta_2 = \delta$), а также одинаковы $R_1 = R_2 = R$. Указанное равенство обеспечиваются выбором типа акселерометров и конструкцией узла крепления их на платформе..

Очевидно, что в значение амплитуды угловой скорости вносит искажение лишь множитель $\cos \delta$. Слагаемое $\sin \delta \cdot \dot{\alpha}_m^2 t$ не влияет на амплитудное значение угловой скорости, оно лишь добавляет линейный тренд угловой скорости, не «растягивая» и не «сжимая» его. Отсюда относительная погрешность определения амплитуды угловой скорости будет определяться выражением

$$\delta\dot{\alpha}_m = \frac{\dot{\alpha}_m \cos \delta - \dot{\alpha}_m}{\alpha_m} 100\% = (\cos \delta - 1) 100\% . \quad (13)$$

При рассмотрении отклонения отстояния осей чувствительности акселерометров от оси вращения платформы выражение для расчета угловой скорости принимает вид

$$\dot{\alpha}_{\text{расч}}(t) = \frac{1}{R_1 + R_2} \int_0^t (a_1^B(\tau) + a_2^B(\tau)) d\tau + \frac{\Delta r_1 + \Delta r_2}{R_1 + R_2} \dot{\alpha}(t) , \quad (14)$$

где $\alpha(t)$ – действительное значение угловой скорости, или с учетом (10)

$$\dot{\alpha}_{\text{расч}}(t) = \left(1 + \frac{\Delta r_1 + \Delta r_2}{R_1 + R_2} \right) \dot{\alpha}(t) .$$

При этом относительная погрешность определения амплитуды угловой скорости определяется как

$$\delta\dot{\alpha}_m = \frac{\Delta r_1 + \Delta r_2}{R_1 + R_2} 100\% .$$

В качестве примера оценки погрешности представленной методики выполнения измерений были проведены расчеты при следующих допущениях: $R_1 = R_2 = 150,5$ мм, $\Delta r_1 = \Delta r_2 = 5$ мм, $\Delta y = 10$ мм $\delta_1 = 3^\circ$. Учитывая, что при исследовании принято $\dot{\alpha}_m = 50^\circ/\text{с}$, $f = 50$ Гц получим, что суммарная относительная погрешность методики данным случае составляет 3,3 %.

Результаты проведенных испытаний с использованием виброакселерометров приведены на рис. 7

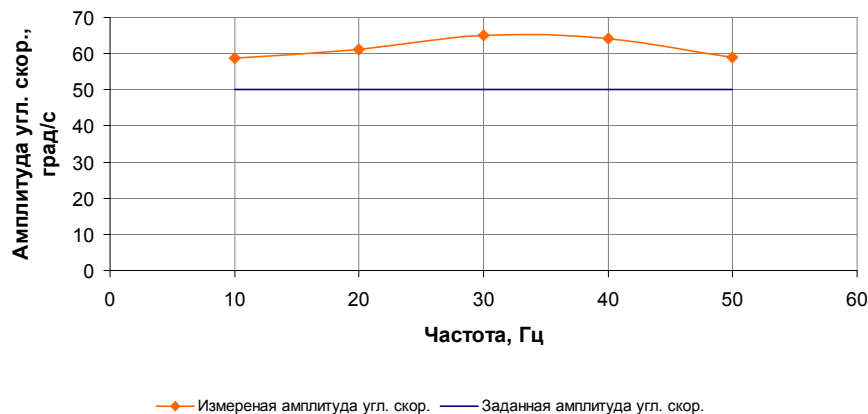


Рис. 7. Диапазон частот воспроизводимой угловой скорости (при амплитуде угловой скорости $50^\circ/\text{с}$)

Оценка точностных характеристик стенда с помощью волоконно-оптического гироскопа

Для сравнения полученных результатов были проведены испытания с использованием датчика угловой скорости на основе волоконно-оптического гироскопа. Основные технические характеристики использовавшегося ВГ910Ф представлены ниже:

Диапазон измерений	$\pm 300^\circ/\text{с}$
Нелинейность масштабного коэффициента	5%
Диапазон частот	0–300 Гц

Результаты испытаний с использованием ВГ910Ф приведены на рис. 8.

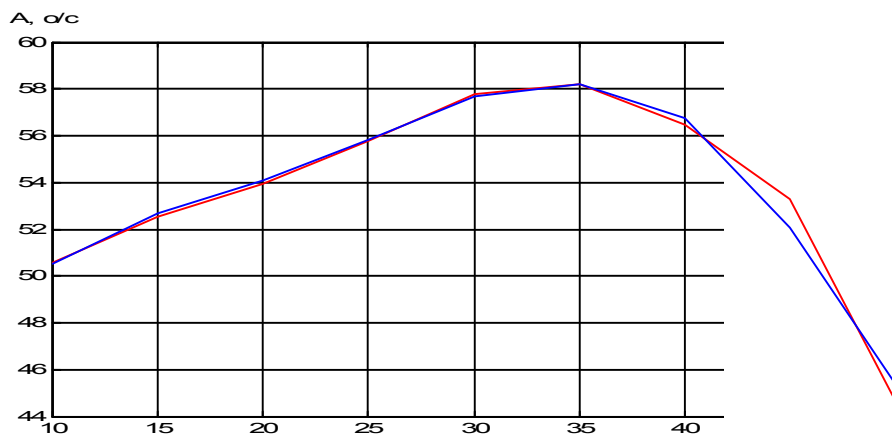


Рис. 8.

Характер полученной кривой соответствует таковой при использовании виброакселерометров, за исключением систематической составляющей.

Выводы

Экспериментальные исследования показали, что разработанная методика оценивания метрологических характеристик стенда переменных угловых скоростей с использованием линейных акселерометров в проведенных измерениях имеет достаточно большие погрешности (более 3%). Следует однако отметить, что приведенные оценки существенно завышены, поскольку при проведении экспериментов были использованы достаточно грубые приспособления и виброакселерометры типа 4321 (фирма «Брюль и Кьер»), положение осей чувствительности которых точно не определены относительно базовой (установочной) плоскости. Применение более точных акселерометров, например АТ1105 (ОАО «Темп-Авиа», г.Арзамас), а также использование для оценивания радиусов их установки на платформе стенда методики, разработанной во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, позволит существенно снизить погрешность предложенной методики.

Использование ВОГ для оценивания динамических характеристик стенда ограничено по частотному диапазону из-за наличия в выходном контуре прибора фильтра с полосой пропускания 30-40 Гц. Именно поэтому характеристика, приведенная на рис. 8 имеет «завал» начиная с частоты 40 Гц.

Неравномерность частотной характеристики стенда объясняется его конструктивными особенностями: а) наличием нелинейных элементов (безлюфтовый шарнир) и зазоров в зубчатой передаче датчика угла стенда. При этом относительная погрешность воспроизведения угловой скорости (без учета систематической составляющей) составляет 10 %.

Таким образом, результаты исследований показали работоспособность предложенной методики оценивания угловой скорости угловых колебаний платформы стенда, предназначенного для оценивания динамических характеристик микромеханических гироскопов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бердюгин, А. В.** Стенд для оценки частотных характеристик малогабаритных датчиков угловых скоростей / А. В. Бердюгин, Д. И. Лычев // Материалы VIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб.: «Электроприбор», 2007.
2. **Пат. 2 306 571 С1** Российская Федерация, МПК⁷ G 01 P 21/00, G 01 M 17/00. Стенд для воспроизведения угловых скоростей / Д. Г. Грязин, Д. И. Лычев, А. В. Бердюгин; заявитель и патентообладатель ФГУП «ЦНИИ Электроприбор». – № 2006115534/28; заявл. 02.05.06; опубл. 20.09.07, Бюл. № 26. – 4 с.: ил.
3. **Яблонский, А. А.** Курс теоретической механики. Ч II. Динамика. Изд. 4-е, дополн.: Учебник для высших технических учебных заведений. – М.: Высшая школа, 1971.