

А. Н. Грибов, Ю. Н. Журавлев,
В. Г. Мацевич, В. Я. Смирнов, В. С. Шкаликов

НПО ВНИИМ им.Д.И.Менделеева □

□

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ □

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ □

МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН □

□

Сборник научных трудов

ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЬ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ВИБРАЦИИ С АКТИВНОЙ МАГНИТНОЙ ПОДВЕСКОЙ ПОДВИЖНОЙ ЧАСТИ

Для метрологической аттестации низкочастотных вибропреобразователей скорости и ускорения требуется воспроизведение вибраций в инфразвуковой области частот. При этом для увеличения отношения сигнал – шум необходимо повысить уровень воспроизводимых вибраций. При синусоидальной форме воспроизведения и заданном спектре частот это возможно только за счет увеличения виброперемещения. С этой целью разработан, изготовлен и испытан электродинамический вибровозбудитель ВМГ-1, предназначенный для воспроизведения гармонических горизонтальных вибраций в диапазоне частот до 5 Гц с максимальной амплитудой колебаний 0,125 м. В отличие от известных устройств [1] в данном вибровозбудителе используются стержневой магнитопровод и активная магнитная подвеска подвижной части (рис. 1).

Магнитопровод вибровозбудителя состоит из трех цилиндрических продольных и двух поперечных стержней, выполненных из стали Армко. Постоянное магнитное поле создается четырьмя катушками подмагничивания, которые питаются стабилизированным постоянным током I_1 . Расположенные на поперечных стержнях катушки подмагничивания позволяют уменьшать влияние их магнитных полей рассеяния на однородность магнитного поля в рабочем зазоре. Схема соединения катушек подмагничивания (рис. 2) обеспечивает взаимную компенсацию возникающих в них ЭДС.

Подвижная катушка, питаемая синусоидальным током, свободно одета на центральный продольный стержень магнитопровода. Вместе с подвижной частью она прикреплена к активным магнитным опорам, которые перемещаются вдоль ферромагнитных направляющих, расположенных параллельно продольным стержням магнитопровода.

Расчет магнитных цепей произведем по схеме (рис. 3). Рассмотрим вибровозбудитель как электрическую систему. Положение подвижной системы определяется координатой $z(t)$ центра подвижной катушки, отсчитываемой от середины магнитопровода, и током $i_2(t)$ в подвижной катушке. Допустим, что магнитные цепи линейные, а коэффициент самоиндукции электромагнитного контура не зависит от координаты z . Тогда уравнение соотношений состояния системы можно записать в виде

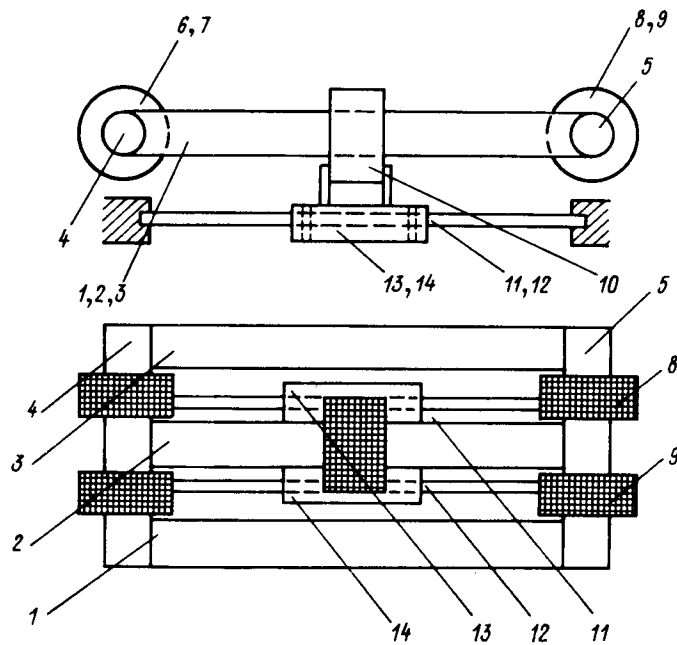


Рис. 1. Конструктивная схема вибровозбудителя ВМГ-1
1, 2, 3 – продольные стержни магнитопровода; 4, 5 – поперечные стержни магнитопровода; 6, 7, 8, 9 – катушки подмагничивания; 10 – подвижная катушка; 11, 12 – направляющие; 13, 14 – корпуса активных магнитных опор

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{z} &= L'_{12} I_1 i_2 \\ L_{22} \ddot{z} + L'_{12} I_1 \dot{z} + R_2 i_2 &= e_2(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где m – масса подвижной части системы; $L_{22} = \text{const}$ – коэффициент самоиндукции подвижного контура; $L_{12} = L_{12}(z)$ – коэффициент взаимной индукции подвижного и неподвижного контуров ($L'_{12} = dL_{12}/dz$); R_2 – активное сопротивление подвижного контура; $e(t)$ – ЭДС подвижного контура.

Подставив i_2 в уравнение (1), получим

$$\frac{mL_{22}}{L'_{12} I_1} \ddot{z} + \frac{mR_2}{L'_{12} I_1} \dot{z} + L'_{12} I_1 \ddot{z} = e_2(t). \quad (2)$$

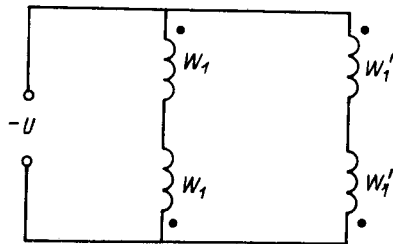


Рис. 2. Схема соединения катушек подмагничивания

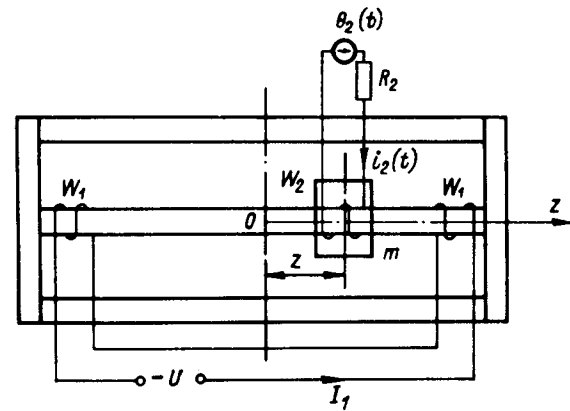


Рис. 3. Расчетная схема магнитной цепи вибровозбудителя

Отсюда следует, что система не имеет положения равновесия.

Для обеспечения устойчивого положения равновесия и воспроизведения гармонической вибрации с частотой ω воспользуемся законом формирования ЭДС $e_2(t)$ в виде

$$e_2(t) = E_2 \sin \omega t - k_b \dot{z} - k_c z, \quad (3)$$

где E_2 – амплитуда вынуждающей составляющей ЭДС; k_b , k_c – коэффициенты усиления в цепи отрицательной обратной связи по скорости и положению подвижной части.

С учетом (3) приведем уравнение (2) к виду:

$$m\tau \ddot{z} + m\ddot{z} + b\dot{z} + cz = P_0 \sin \omega t, \quad (4)$$

где $\tau = L_{22}/R_2$; $b = (L'_{12} I_1 + k_b) L'_{12} I_1 / R_2$; $c = k_c L'_{12} I_1 / R_2$; $P_0 = E_2 L'_{12} I_1 / R_2$.

С помощью индуктивного датчика координаты z и дифференцирующего звена для получения скорости $\dot{z}$ реализуем закон (3). По критерию Гурвица положение равновесия будет асимптотически устойчиво, если $b > \tau c$.

Предположим, что требуется обеспечить амплитуду колебаний A на заданной частоте ω . При этом задан требуемый закон движения подвижной части в виде $z(t) = A \sin(\omega t - \varphi)$, где φ – некоторый произвольный угол сдвига фазы $z(t)$ по отношению к $E_2 \sin \omega t$. Отметим, что в вибровозбудителе ВМГ-1 $A = 0,125$ м, $\omega = 1,0$ Гц. Из уравнения (4) видно, что амплитуда вынуждающей составляющей ЭДС должна быть равной

$$E_2 = \frac{AR_2}{L'_{12} I_1} \sqrt{(c - m\omega^2)^2 + \omega^2 (b - m\tau\omega^2)^2}, \quad (5)$$

при этом ток в подвижной катушке будет изменяться по закону

$$i_2(t) = -\frac{Am\omega^2}{L'_{12} I_1} \sin(\omega t - \varphi), \quad (6)$$

а тяговая электромагнитная сила, действующая на подвижную катушку, равна

$$F(t) = L'_{12} I_1 i_2(t). \quad (7)$$

Из расчетной схемы магнитной цепи (см. рис. 3), имеющей распределенные по длине параметры, следует, что L'_{12} будет равен:

$$L'_{12} = \frac{w_1 w_2 g_s}{\text{ch}(al/2)} \left(1 + \frac{1}{2} a^2 z^2\right), \quad (8)$$

где w_1, w_2 — число витков в неподвижной и подвижной катушках соответственно; l — длина продольных стержней; $a = \sqrt{g_s \rho_c}$; g_s — приведенная поперечная магнитная проводимость единицы длины рабочего зазора; ρ_c — приведенное продольное магнитное сопротивление единицы длины стержней магнитопровода [2];

$$g_s \approx \frac{2\pi\mu_0}{\ln(L/d + \sqrt{(L/d)^2 - 1})}, \quad \rho_c \approx \frac{3}{2\mu_c S_s}.$$

Здесь $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; L — расстояние между осями продольных стержней; d — диаметр стержней; $S_s = \pi d^2/4$; μ_c — магнитная проницаемость стали.

Магнитная подвеска подвижной части вибровозбудителя состоит из двух цилиндрических алюминиевых корпусов, внутри которых закреплены по две активные магнитные опоры (АМО), двух ферромагнитных цилиндрических направляющих и блока управления опорами.

На рис. 4 приведена конструктивная схема опоры, которая имеет силовую и измерительную части. Силовая часть служит для восприятия нагрузок и представляет собой восьмиполюсный статор, выполненный в виде кольцевого пакета из листовой электротехнической стали. Радиальный воздушный зазор между статором и направляющей равен 0,2 мм. Обмотки каждого двух соседних полюсов соединяются и образуют электромагнит из четырех силовых электромагнитов, два из которых удерживают подвижную часть по оси O_x , два других — по оси O_y .

Измерительная часть содержит индуктивные датчики перемещения опоры относительно тех же осей. Датчик — восьмиполюсный статор с обмотками, кон-

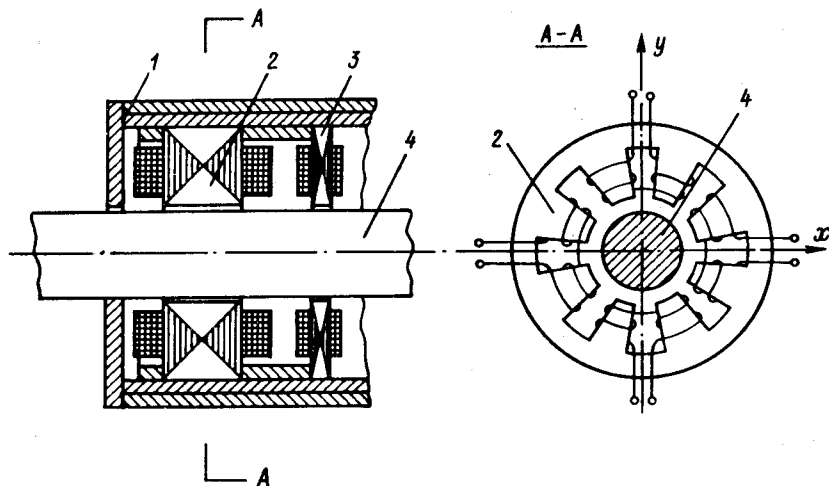
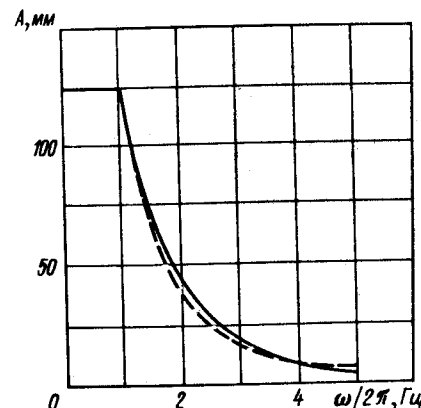


Рис. 4. Конструктивная схема активной магнитной опоры
1 — корпус опоры; 2 — статор опоры; 3 — статор индуктивных датчиков; 4 — ферромагнитная направляющая

Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика вибровозбудителя при нормальных значениях токов в катушках
— — экспериментальная; — — — — расчетная



струкция которого аналогична конструкции силового статора. Разница лишь в значительно меньшей толщине пакетов стали и в обмоточных данных.

АМО работают по известному принципу активного магнитного подвеса ферромагнитного тела. При смещении статора опоры из положения равновесия относительно направляющей датчик вырабатывает сигнал, пропорциональный этому смещению. Далее сигнал с датчика обрабатывается электронной системой управления, которая изменяет токи в соответствующих электромагнитах таким образом, что нарушенное положение равновесия восстанавливается [3].

Активная подвеска обладает следующими достоинствами: отсутствием смазки, достаточно большие воздушные зазоры, невосприимчивость к загрязнениям, высокая надежность и простота обслуживания.

Основные результаты испытаний вибровозбудителя ВМГ-1 представлены на рис. 5, откуда видно, что амплитуда колебаний подвижной части в диапазоне частот 0,1–1,0 Гц составляет 0,125 м. На частотах менее 1,0 Гц ограничение на амплитуду накладывалось лишь со стороны продольного размера магнитопровода. В диапазоне частот 1,0–5,0 Гц амплитуда колебаний убывает по закону, близкому к параболическому.

Электромагнитная сила, действующая на подвижную катушку, измерялась непосредственным и косвенным методами. Непосредственный метод дал 16 Н, косвенный — 17,2 Н; расхождение результатов относительно невелико.

Магнитные измерения показали, что поле в рабочем зазоре достаточно однородно в продольном направлении, т. е. магнитная индукция весьма мало зависит от координаты z . В той части рабочего зазора, где движется подвижная катушка, относительная неоднородность поля составила 1,7%.

Непосредственно измеренный коэффициент высших гармонических составляющих в законе движения подвижной части с частотой 2,1 Гц составил 0,7%, при этом амплитуда поперечных колебаний подвижной части не может превышать величины радиального зазора в опорах, что составит 0,1% от амплитуды продольных колебаний. Грузоподъемность активной магнитной подвески подвижной части — 50 Н. Трение в подвеске, обусловленное вихревыми токами, весьма мало; коэффициент трения — $2,1 \cdot 10^{-4}$. Экспериментально полученные характеристики вибровозбудителя почти совпадают с расчетными.

Список литературы

1. Генкин М. Д. Электродинамические вибраторы. М.: Машиностроение, 1975, 98 с.
2. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю. М. Пятина. М.: Энергия, 1980, 488 с.
3. Журавлев Ю. Н., Ветлицын А. М., Хмылко Н. В. Экспериментальное исследование электромагнитных опор для высокоскоростных роторов // Станки и инструменты. 1982. № 5. С. 13–14.