

**К.Б. МЯГКОХЛЕБ**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИПМаш НАН  
Украины, Харьков

## **ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕЙ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ТРЕХКООРДИНАТНОЙ НАГРУЗКИ**

У роботі показані особливості побудови математичної моделі руху платформи трьохкоординатного електромагнітного вібростенда (ЕМВС). На основі розробленої математичної моделі складена структурна схема ЕМВС. Показані шляхи компенсації кутових коливань.

**Ключові слова:** математична модель, електромагнітний вібростенд, кутові коливання.

В работе показаны особенности построения математической модели движения платформы трехкоординатного электромагнитного вибростенда (ЭМВС). На основе разработанной математической модели составлена структурная схема ЭМВС. Показаны пути компенсации угловых колебаний.

**Ключевые слова:** математическая модель, электромагнитный вибростенд, угловые колебания.

In the report the features of construction of mathematical model of movement(traffic) of a platform of the three-coordinate electromagnetic vibrating stand (EMVS) are shown. On the basis of the developed mathematical model the block diagram EMVS is made. The ways of indemnification of are shown.

**Keyword:** mathematical model, electromagnetic vibrating stand, angular fluctuations.

**Введение.** Работа по созданию систем электромагнитного возбуждения механических колебаний, для различных технологических процессов, в частности для колебания литейных форм при изготовлении отливок из разных металлов и сплавов является актуальной, поскольку направлена на повышение качества литья с использованием более экономичного оборудования. Так же многокоординатные вибростенды играют важную роль в современной испытательной технике при решении задач сокращения времени испытаний и повышения достоверности получаемых оценок, поскольку формируемые на них вибрации наиболее полно соответствуют эксплуатационным нагрузкам.

**Постановка проблемы.** Рассмотрим трехкоординатный ЭМВС, приведенный на рис. 1. принцип возбуждения колебаний платформы, связанной с тремя якорями определенным образом, основано на воздействии на якоря переменным магнитным полем, действующим одновременно по трем направлениям.

Уравнения динамики трехкоординатного ЭМВС, полученные на основании уравнений Лагранжа-Максвелла [1], имеют вид

$$m\ddot{x} + b_x\dot{x} + c_x x = DI_x^{*2} \left[ a + \frac{1}{2} \delta(\Psi + \theta) \right];$$

$$\begin{aligned}
m\ddot{y} + b_y\dot{y} + c_y y &= -c_y \Psi a + DI_y^{*2} \left[ a + \frac{1}{2} \delta(\varphi + \Psi) \right]; \\
m\ddot{z} + b_z\dot{z} + c_z z &= DI_z^{*2} \left[ a + \frac{1}{2} \delta(\varphi + \theta) \right]; \\
J_z \ddot{\varphi} &= -J_z \ddot{\Psi} + \frac{1}{2} D \delta \left[ I_y^{*2} (\delta - y) + I_z^{*2} (\delta - z) \right]; \\
J_z \ddot{\Psi} + c_y \varphi a^2 + b_y \dot{\Psi} a^2 &= -J_z \ddot{\varphi} - c_y y a - b_y \dot{y} a + \frac{1}{2} D \delta \left[ I_x^{*2} (\delta - x) + I_y^{*2} (\delta - y) \right]; \\
J_x \ddot{\theta} &= \frac{1}{2} D \delta \left[ I_x^{*2} (\delta - x) + I_z^{*2} (\delta - z) \right]; \\
\dot{I}_x^* \left[ a + \delta - x + \frac{1}{2} \delta(\Psi + \theta) \right] + I_x^* \left[ \frac{R_x (\delta - x)}{2D} - \left( \dot{x} - \frac{1}{2} \delta(\dot{\Psi} + \dot{\theta}) \right) \right] &= \frac{U_x}{2D}; \\
\dot{I}_y^* \left[ a + \delta - y + \frac{1}{2} \delta(\varphi + \Psi) \right] + I_y^* \left[ \frac{R_y (\delta - y)}{2D} - \left( \dot{y} - \frac{1}{2} \delta(\dot{\varphi} + \dot{\Psi}) \right) \right] &= \frac{U_y}{2D}; \\
\dot{I}_z^* \left[ a + \delta - z + \frac{1}{2} \delta(\varphi + \theta) \right] + I_z^* \left[ \frac{R_z (\delta - z)}{2D} - \left( \dot{z} - \frac{1}{2} \delta(\dot{\varphi} + \dot{\theta}) \right) \right] &= \frac{U_z}{2D},
\end{aligned}$$

где  $I_q^* = \frac{I_q}{\delta - q}$ ;  $D = \frac{w^2 \mu \mu_0 (a + \delta)}{2}$ ,  $q$  – линейные обобщенные координаты,  $m$

– масса платформы;  $c_x, c_y, c_z$  – коэффициенты жесткости упругих элементов, установленных соответственно по координатам  $x, y, z$ ;  $x, y, z, \varphi, \Psi, \theta$  – перемещения массы  $m$ ;  $b_x, b_y, b_z$  – коэффициенты диссипации;  $J_x, J_y, J_z$  – моменты инерции платформы;  $I_x, I_y, I_z$  – токи в катушках;  $\delta$  – величина воздушных зазоров,  $(a + \delta)(a + \delta - x + \frac{1}{2} \delta \Psi + \frac{1}{2} \delta \theta)$ ,  $(a + \delta)(a + \delta - y + \frac{1}{2} \delta \varphi + \frac{1}{2} \delta \Psi)$ ,  $(a + \delta)(a + \delta - z + \frac{1}{2} \delta \varphi + \frac{1}{2} \delta \theta)$  – площади воздушных зазоров по координатам  $x, y, z$  соответственно,  $a$  – сторона сечения магнитопровода,  $w$  – число витков,  $R$  – активное сопротивление катушек,  $\mu, \mu_0$  – магнитные проницаемости.

Для составления структурной схемы трехкоординатного ЭМВ воспользуемся преобразованием Лапласа

$$\begin{aligned}
x(mp^2 + b_x p + c_x) &= DI_x^{*2} \left[ a + \frac{1}{2} \delta(\Psi + \theta) \right]; \\
y(mp^2 + b_y p + c_y) &= -c_y \Psi a + DI_x^{*2} \left[ a + \frac{1}{2} \delta(\varphi + \Psi) \right]; \\
z(mp^2 + b_z p + c_z) &= DI_z^{*2} \left[ a + \frac{1}{2} \delta(\varphi + \theta) \right];
\end{aligned}$$

$$\varphi I_z p^2 = -\Psi I_z p^2 + \frac{1}{2} D \delta [I_y^{*2} (\delta - y) + I_z^{*2} (\delta - z)];$$

$$\Psi (J_z p^2 + b_y a^2 p + c_y a^2) = -\varphi J_z p^2 - y (p b_y a + c_y a) + \frac{1}{2} D \delta [I_x^{*2} (\delta - x) + I_y^{*2} (\delta - y)];$$

$$\theta J_x p^2 = \frac{1}{2} D \delta [I_x^{*2} (\delta - x) + I_z^{*2} (\delta - z)];$$

$$I_x^* = \frac{U_x}{2D(a+\delta)p + R\delta} + I_x^* x \frac{(4Dp + R)}{2D(a+\delta)p + R\delta} - I_x^* \frac{2D\delta}{2D(a+\delta)p + R\delta(\Psi + \theta)};$$

$$I_y^* = \frac{U_y}{2D(a+\delta)p + R\delta} + I_y^* y \frac{(4Dp + R)}{2D(a+\delta)p + R\delta} - I_y^* \frac{2D\delta(\varphi + \Psi)}{2D(a+\delta)p + R\delta};$$

$$I_z^* = \frac{U_z}{2D(a+\delta)p + R\delta} + I_z^* z \frac{(4Dp + R)}{2D(a+\delta)p + R\delta} - I_z^* \frac{2D\delta(\varphi + \theta)}{2D(a+\delta)p + R\delta}.$$

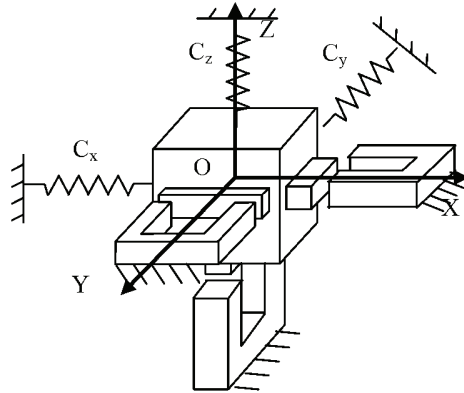


Рисунок 1 – Общий вид ЭМВС

Введем следующие обозначения

$$\frac{1}{2D(a+\delta)p + R\delta} = W_1;$$

$$4D = W_6;$$

$$p b_y a + c_y a = W_{13};$$

$$\frac{1}{m p^2 + b_x p + c_x} = W_2;$$

$$D = W_7;$$

$$\frac{\frac{1}{2} \delta D}{J_z p^2} = W_{15};$$

$$\frac{1}{m p^2 + b_y p + c_y} = W_3;$$

$$\frac{1}{2} \delta = W_9;$$

$$\delta = W_{10};$$

$$\frac{\frac{1}{2} \delta D}{J_x p^2} = W_{16};$$

$$\frac{1}{m p^2 + b_z p + c_z} = W_4;$$

$$\frac{1}{2} \delta D = W_{11};$$

$$J_z p^2 = W_{12};$$

$$\frac{c_y a}{m p^2 + b_y p + c_y} = W_{17}.$$

$$4Dp + R = W_5;$$

Структурная схема трехкоординатного ЭМВ представлена на рис. 2. Как видно из структурной схемы в системе имеются угловые колебания, которые не поддаются компенсации при принятой начальной конструкции трехкоординатного ЭМВ. Для компенсации угловых колебаний необходимо увеличение числа электромагнитных вибраторов по каждой координате.

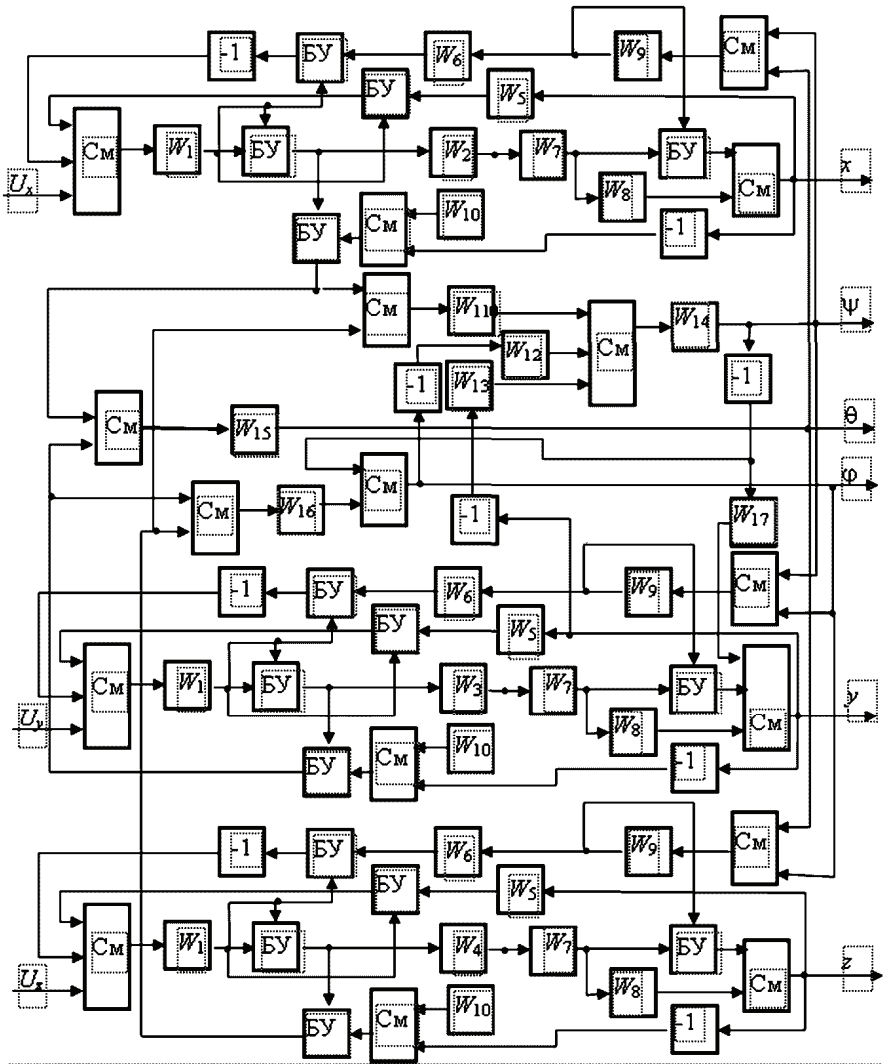


Рисунок 2 – Структурная схема трехкоординатного вибростенда

На основании данных математической модели и структурной схемы в лаборатории отдела надежности и динамической прочности ИПМаш НАНУ был разработан многокоординатный электромагнитный вибростенд, представленный на рис. 3, на него получен патент Украины на изобретение [2].

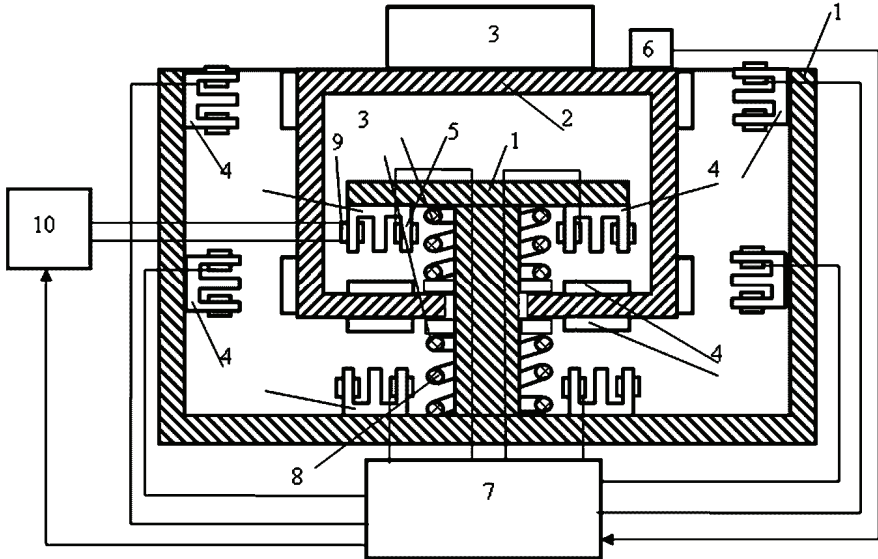


Рисунок 3 – Многокоординатный вибростенд: 1 – основание; 2 – платформа; 3 – объект нагружения; 4 – вибровозбудители; 5 – обмотки возбуждения; 6 – блок вибропреобразователей; 7 – система управления; 8 – соединительные узлы; 9 – обмотки постоянного тока; 10 – регулируемый источник постоянного напряжения

Многокоординатный вибростенд работает следующим образом. Система управления 7 формирует управляющие сигналы, которые отвечают программе испытаний, и поступают на вибровозбудители 4, которые передают вибрационное воздействие на платформу 2, где расположены объект нагружения 3 и блок вибропреобразователей 6. В процессе испытаний блок вибропреобразователей 6 фиксирует механические колебания, которые испытывает объект нагружения 3, и превращает их в электрический сигнал. Исходный сигнал блока вибропреобразователей 6 поступает на вход управляющей системы 7, которая по этому сигналу корректирует необходимые значения сигналов управления любым вибровозбудителем 4. Кроме того, система управления 7 формирует сигналы управления регулируемым источником постоянного напряжения 10, за счет чего формируется необходимое постоянное напряжение на дополнительных обмотках 9 вертикально расположенных электромагнитов 4. Это дает возможность получить компенсирующую электромагнитную силу, линия действия которой противоположна силе гравитации, то есть ис-

ключить влияние весовых параметров объекта нагружения 3 и платформы 2.

Такое построение многокоординатного вибростенда позволяет существенным образом уменьшить влияние соединительных узлов на формирование воспроизводимых нагрузок, а также повысить надежность вибростенда.

Учтя все достоинства данного вибростенда, была разработана двухкоординатная электромагнитная виброустановка для колебаний литейной формы с четырьмя упругими элементами, ее схема приведена на рис. 4.

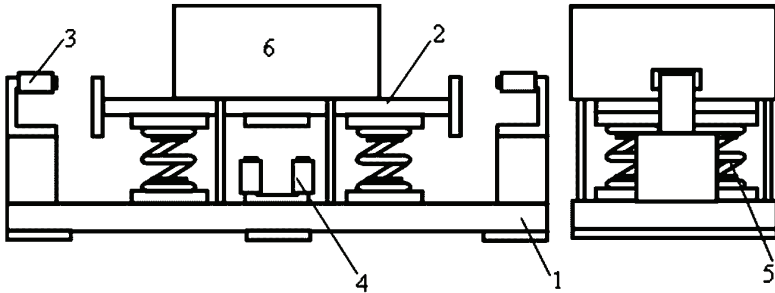


Рисунок 4 – Двухкоординатная электромагнитная виброустановка для колебаний литейной формы в трех проекциях: 1 – основание, 2 – платформа, 3 – горизонтальные вибровозбудители, 4 – вертикальные вибровозбудители, 5 – пружины, 6 – термостат с кокилем

Вертикальный ЭМВ выбран с магнитопроводом большего размера, чем горизонтальный ЭМВ и с более мощными упругими элементами для возможности создания большего перемещения, поскольку при разливке металла масса подвижной системы установки будет изменяться. Кроме того, это вызвано особенностями крепления кокиля и другими требованиями технологического процесса.

На базе патента «Многокоординатный вибростенд» с учетом электромагнитной установки для применения вибрации в технологическом процессе литья. Был получен патент Украины на полезную модель «Способ получения слитков»[3].

**Выводы.** Зная математические модели ЭМВС и представляя себе структуры этих ЭМВС, можно более четко ориентироваться в существе преобразований задающих воздействий при получении необходимых перемещений платформы стенда. Результаты исследований могут использоваться и быть востребованы в различных отраслях народного хозяйства.

**Список литературы:** 1. Божко А.Е. Оптимальное управление в системах воспроизведения вибраций. – К.: Наукова думка, 1977. – 219 с. 2. Патент №43014 А (Украина), МКІ<sup>7</sup> G01M7/00. Багатокординатний вібростенд / А.Е.Божко, В.І.Бельх, К.Б.Мягкохлеб. – Бюл. № 10, опубл. 15.11.2001. 3. Патент на корисну модель № 27319 МПК(2006) B22D11/10 Спосіб одержання зливків / А.Е.Божко, В.І.Бельх, К.Б.Мягкохлеб, С.В.Шепель, В.В.Борисов. – Бюл. № 17, опубл. 25.10.2007.

Поступила в редколлегию 01.10.2012.