

Черевко А. Н.

Хероим Е. А.

Полтавський
національний
технічний
університет
ім. Ю. Кондратюка

УДК 621.01

ВЛИЯНИЕ СДВИГА ФАЗ ДЕБАЛАНСНЫХ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕЙ НА СИЛОВОЕ ПОЛЕ УПРАВЛЯЕМОЙ ВИБРАЦИОННОЙ МАШИНЫ

Обговорюються питання, пов'язані з оцінюванням динамічних можливостей вібраційних машин з керованими тридебалансними вібробудувачами за допомогою теорії приведення системи сил до найпростішого вигляду.

The problems, bound with an estimation of dynamic capabilities of vibrational machines with controllabe unbalanced masses with the help of theory reduction system forces of simple form.

Постановка проблемы. Вибрационная техника широко используется в народном хозяйстве нашей страны. Это металлургия, строительство, добыча полезных ископаемых, транспортировка. Во всех случаях применения вибрации учитывается рациональность применения тех или иных вибрационных полей, а также их структура. Исследование влияния сдвига фаз управляемых дебалансных вибровозбудителей на структуру силового поля, является важной задачей, актуальность которой возрастает в связи с универсальностью такого привода для технологической машины. [1, 2].

Анализ последних исследований и публикаций. Академик К.В. Фролов утверждает, что вибрационная технология является основой технологий будущего [3]. Достижения вибрационной техники, которые базируются на фундаментальных исследованиях теории нелинейных колебаний, отражены в работах П.М. Алабужева, И.И. Блехмана, И.И. Быховского, А.П. Бабичева, Я.Г. Пановко, В.О. Кононенко, Б.И. Крюкова, И.Ф. Гончаревича, Э.Э. Лавендела, В.М. Потураева, К.М. Рагульскиса, Л.И. Сердюка, А.П. Филипова, К.В. Фролова, В.М. Челомея, их коллег и учеников [4 – 7].

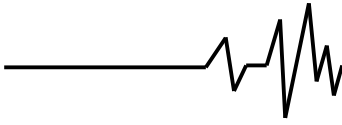
Нерешенные ранее части общей проблемы, которым посвящена статья. Управляемые технологические вибромашин, которые появились в последнее время, имеют необыкновенные сочетания полезных свойств и дают возможность использовать

вибрационную технику там, где еще совсем недавно это считалось нецелесообразным и малоперспективным. Использование в качестве привода такой машины двух однофазных трехдебалансных вибровозбудителей приводит к существенному расширению спектра генерирования вибрационных полей переменной структуры.

Цель работы. Исследование влияния сдвига фаз в блоке генератора колебаний, состоящего из двух однофазных управляемых трехдебалансных вибровозбудителей, на структуру силового поля.

Изложение основного материала. Существует ряд технологических процессов, в которых решающую роль играют вибрационные машины. Очень часто в качестве привода такой машины используется дебалансный вибровозбудитель. Он сравнительно дешевый, прост в изготовлении и обслуживании. Вместе с тем дебалансный вибровозбудитель имеет и ряд существенных недостатков. Наиболее значимыми являются высокая энергоемкость и невысокая надежность этих устройств.

Рационально подобранные рабочие параметры этих механизмов существенно влияют на производительность и качество выпускаемой продукции. Практически все обрабатываемые материалы изменяют свои свойства в процессе обработки, поэтому энергия, подводимая к ним, должна изменяться в процессе работы вибрационной машины. Например, для эффективного уплотнения бетонной смеси необходима нестационарная



энергия вибрационного поля, используемая для переукладки зерен крупного заполнителя в течение всего периода вибрационного разжижения смеси. В этом случае получается бетон более плотной структуры за меньшее время уплотнения.

Известны различные модификации вибрационного оборудования, где используются высоко- и среднечастотные режимы: симметричные с вертикальными и горизонтальными колебаниями, а также асимметричные низкочастотные. Применение в производстве любого из указанных методов обусловлено технологическими факторами, которые непосредственно влияют на качество изделия, однако для высокоэффективного воздействия необходимы низкочастотные колебания переменной амплитуды.

Управляемые вибрационные машины представляют собой качественно новое поколение вибрационной техники. Они позволяют осуществлять технологический процесс с переменными параметрами колебаний рабочего

органа. Амплитуду и частоту колебаний можно изменять независимо друг от друга практически по любому закону. Поэтому главной особенностью управляемой вибрационной машины является возможность воздействовать на обрабатываемую среду переменным (нестационарным) вибрационным силовым полем.

Рассмотрим работу вибрационного блока состоящего из двух трехдебалансных вибровозбудителей.

В рассматриваемой ниже схеме вибровозбудители могут синхронизироваться с вращением в противоположные стороны. Расчетная схема (рис.1) учитывает возможность установки первоначального угла сдвига фаз φ_0 . Разворот трех подвижных дебалансов производится по часовой стрелке, а одного – против, смотря навстречу оси x .

Для определения возможностей блока вибровозбудителей приведем систему сил инерции к простейшему виду.

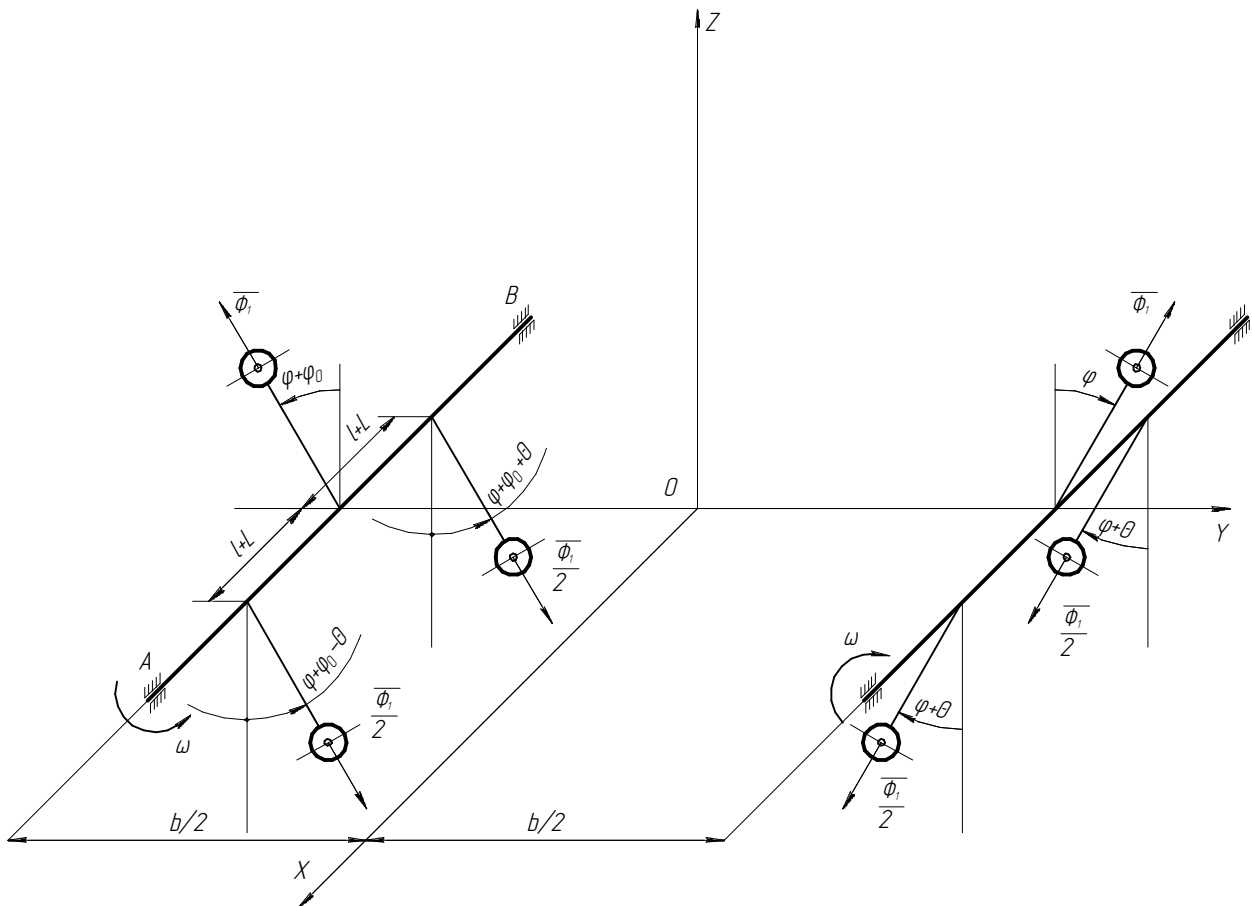
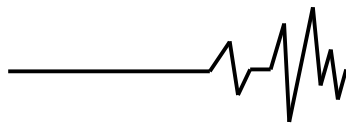


Рис. 1. Расчетная схема блока управляемых вибровозбудителей



Определим главный вектор сил инерции \vec{F}_o :

$$\vec{F}_o = F_x \vec{i} + F_y \vec{j} + F_z \vec{k}.$$

Проекции главного вектора на оси координат определяются по следующим формулам:

$$F_x = \sum F_{ix}; \quad F_y = \sum F_{iy}; \quad F_z = \sum F_{iz}$$

$$\sum F_{ix} = 0;$$

$$\begin{aligned} \sum F_{iy} &= \frac{\Phi_1}{2} \sin(\varphi_0 + \varphi - \theta) - \Phi_1 \sin(\varphi_0 + \varphi) + \Phi_1 \sin \varphi + \\ &+ \frac{\Phi_1}{2} \sin(\varphi + \varphi_0 + \theta) - \frac{\Phi_1}{2} \sin(\varphi + \theta) - \frac{\Phi_1}{2} \sin(\varphi + \theta) = \\ &= \frac{\Phi_1}{2} (\sin(\varphi_0 + \varphi - \theta) + \sin(\varphi + \varphi_0 + \theta)) - \Phi_1 \times \\ &\times \sin(\varphi_0 + \varphi) - \Phi_1 (\sin(\varphi_0 + \varphi) - \sin \varphi) = \frac{\Phi_1}{2} \cdot 2 \times \\ &\times \sin \frac{\varphi_0 + \varphi - \theta + \varphi + \varphi_0 + \theta}{2} \cos \frac{\varphi_0 + \varphi - \theta - \varphi - \varphi_0 - \theta}{2} - \\ &- \Phi_1 \sin(\varphi_0 + \varphi) - \Phi_1 \left(2 \cos \frac{\varphi + \theta + \varphi}{2} \sin \frac{\varphi + \theta - \varphi}{2} \right) = \\ &= -2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) + \sin(\varphi_0 + \varphi) \sin \frac{\theta}{2} \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum F_{iz} &= -\frac{\Phi_1}{2} \cos(\varphi + \varphi_0 - \theta) + \Phi_1 \cos(\varphi_0 + \varphi) + \Phi_1 \times \\ &\times \cos \varphi - \frac{\Phi_1}{2} \cos(\varphi + \varphi_0 + \theta) - \frac{\Phi_1}{2} \cos(\varphi + \theta) - \frac{\Phi_1}{2} \times \\ &\times \cos(\varphi + \theta) = \Phi_1 \cos(\varphi_0 + \varphi) - \frac{\Phi_1}{2} (\cos(\varphi + \varphi_0 - \theta) + \\ &+ \cos(\varphi + \varphi_0 + \theta)) - \Phi_1 (\cos(\varphi + \theta) - \cos \varphi) = \Phi_1 \times \\ &\times \cos(\varphi_0 + \varphi) - \frac{\Phi_1}{2} \left(2 \cos \frac{\varphi_0 + \varphi - \theta + \varphi + \varphi_0 + \theta}{2} \times \right. \\ &\times \left. \cos \frac{\varphi_0 + \varphi - \theta - \varphi - \varphi_0 - \theta}{2} \right) - \Phi_1 (-2 \sin \frac{\varphi + \varphi + \theta}{2} \times \\ &\times \sin \frac{\varphi - \varphi + \theta}{2}) = \\ &= 2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) + \cos(\varphi_0 + \varphi) \sin \frac{\theta}{2} \right). \end{aligned}$$

$$F_o = \sqrt{(\sum F_{ix})^2 + (\sum F_{iy})^2 + (\sum F_{iz})^2}$$

$$\begin{aligned} F_o &= \left(\left(-2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) + \sin(\varphi_0 + \varphi) \sin \frac{\theta}{2} \right) \right)^2 + \right. \\ &+ \left. \left(2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos(\varphi_0 + \varphi) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) \right) \right)^2 \right)^{1/2} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\left(\sin(\varphi + \varphi_0) \sin \frac{\theta}{2} - \cos \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) \right)^2 + \right. \\ &+ \left. \left(\cos(\varphi + \varphi_0) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) \right)^2 \right)^{1/2} = 2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \times \\ &\times \left(\cos^2 \frac{\theta}{2} + 4 \sin \frac{\theta}{2} \cos \left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} \right) \sin \left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} + \frac{\theta}{2} \right) \right)^{1/2}; \end{aligned}$$

Определим главный момент сил инерции \vec{M}_o .

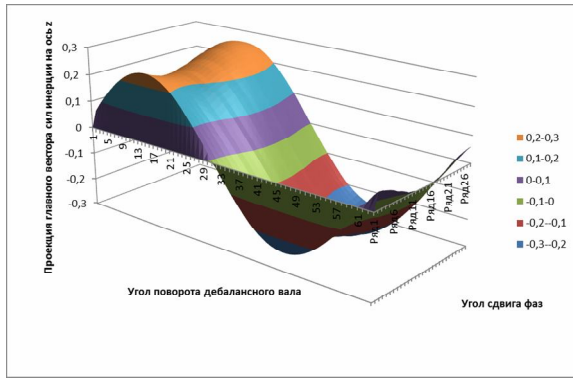
$$\vec{M}_o = M_x \vec{i} + M_y \vec{j} + M_z \vec{k};$$

где: $M_x = \sum M_{ix}; M_y = \sum M_{iy}; M_z = \sum M_{iz}$.

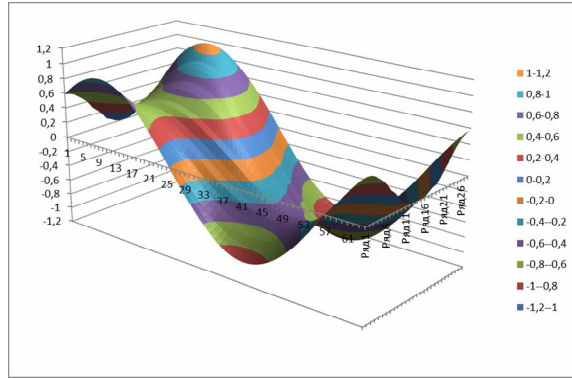
$$\begin{aligned} \sum M_{ix} &= \Phi_1 \frac{b}{4} \cos(\varphi + \varphi_0 - \theta) - \Phi_1 \frac{b}{2} \cos(\varphi + \varphi_0) + \Phi_1 \times \\ &\times \frac{b}{4} \cos(\varphi + \varphi_0 + \theta) - \Phi_1 \frac{b}{4} \cos(\varphi + \theta) + \Phi_1 \frac{b}{2} \cos \varphi - \Phi_1 \times \\ &\times \frac{b}{4} \cos(\varphi + \theta) = -\Phi_1 \frac{b}{2} \cos(\varphi + \varphi_0) + \Phi_1 \frac{b}{4} \times \\ &\times (\cos(\varphi + \varphi_0 - \theta) + \cos(\varphi + \varphi_0 + \theta)) + \Phi_1 \frac{b}{2} \times \\ &\times (\cos \varphi - \cos(\varphi + \theta)) = -\Phi_1 \frac{b}{2} \cos(\varphi + \varphi_0) + \Phi_1 \frac{b}{4} \times \\ &\times \left(2 \cos \frac{\varphi + \varphi_0 - \theta + \varphi + \varphi_0 + \theta}{2} \times \right. \\ &\times \left. \cos \frac{\varphi + \varphi_0 - \theta - \varphi - \varphi_0 - \theta}{2} \right) + \Phi_1 \frac{b}{2} \left(-2 \sin \frac{\varphi + \varphi + \theta}{2} \times \right. \\ &\times \left. \sin \frac{\varphi - \varphi - \theta}{2} \right) = \\ &= \Phi_1 b \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) - \cos(\varphi + \varphi_0) \sin \frac{\theta}{2} \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum M_{iy} &= \frac{\Phi_1}{2} (l + L) \cos(\varphi + \varphi_0 - \theta) - \frac{\Phi_1}{2} (l + L) \times \\ &\times \cos(\varphi + \varphi_0 + \theta) = \frac{\Phi_1}{2} (l + L) (\cos(\varphi + \varphi_0 - \theta) - \\ &- \cos(\varphi + \varphi_0 + \theta)) = -2 \frac{\Phi_1}{2} (l + L) \times \\ &\times \sin \frac{\varphi + \varphi_0 - \theta + \varphi + \varphi_0 - \theta}{2} \sin \frac{\varphi + \varphi_0 - \theta - \varphi - \varphi_0 - \theta}{2} = \\ &= \Phi_1 (l + L) \sin(\varphi + \varphi_0) \sin \theta; \end{aligned}$$

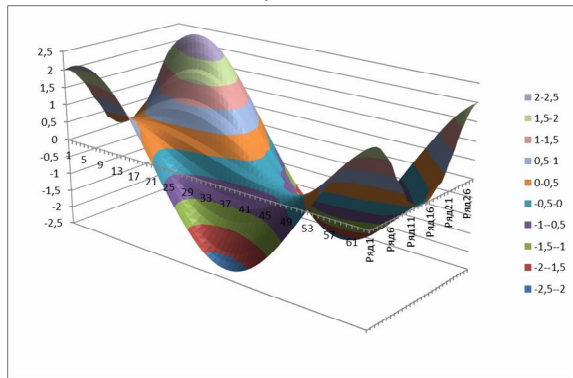
$$\begin{aligned} \sum M_{iz} &= \frac{\Phi_1}{2} (l + L) \sin(\varphi + \varphi_0 - \theta) - \frac{\Phi_1}{2} (l + L) \times \\ &\times \sin(\varphi + \varphi_0 + \theta) = \frac{\Phi_1}{2} (l + L) (\sin(\varphi + \varphi_0 - \theta) - \\ &- \sin(\varphi + \varphi_0 + \theta)) = \frac{\Phi_1}{2} (l + L) \cdot 2 \times \\ &\times \cos \frac{\varphi + \varphi_0 - \theta + \varphi + \varphi_0 + \theta}{2} \sin \frac{\varphi + \varphi_0 - \theta - \varphi - \varphi_0 - \theta}{2}. \end{aligned}$$



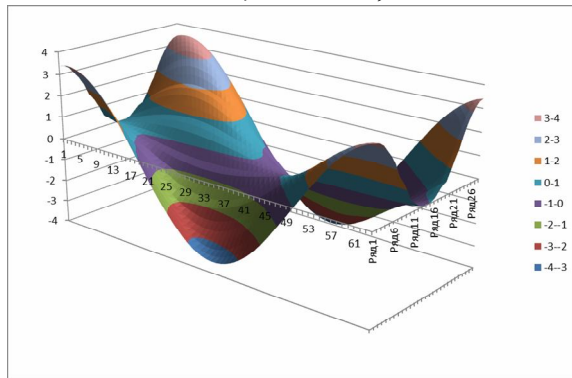
а) $\theta = 0,25$;



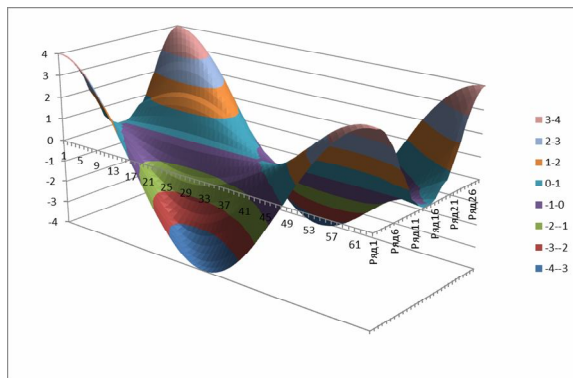
б) $\theta = 0,785$;



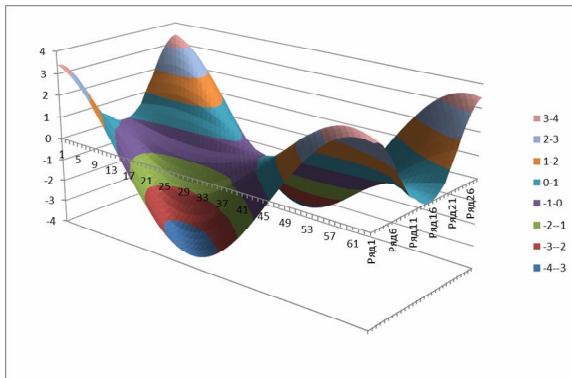
в) $\theta = 1,57$;



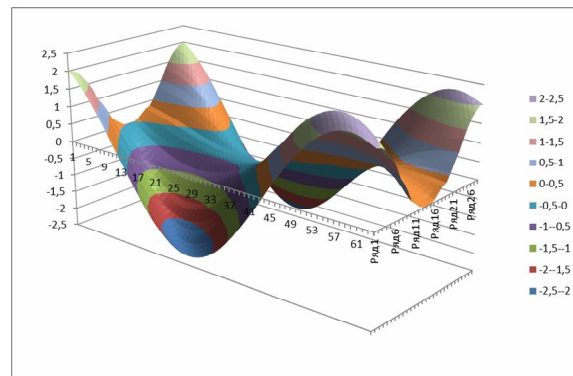
г) $\theta = 2,355$;



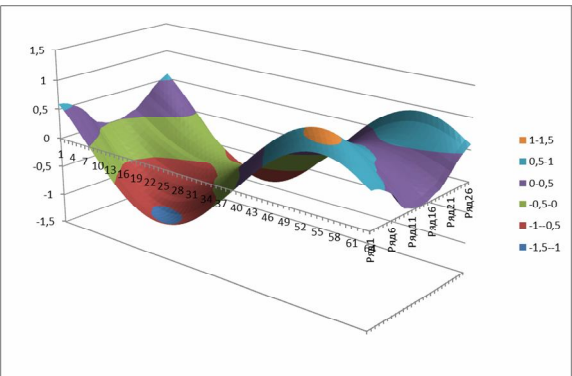
д) $\theta = 3,14$;



е) $\theta = 3,925$;

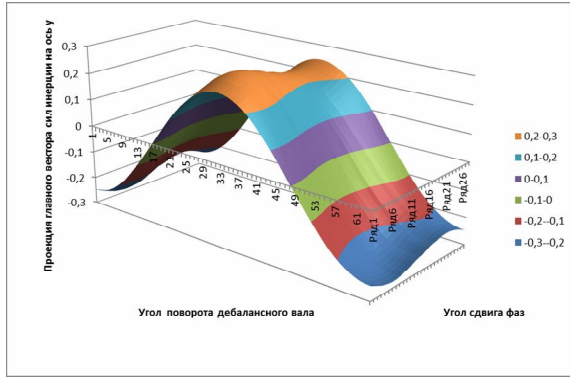


ж) $\theta = 4,71$;

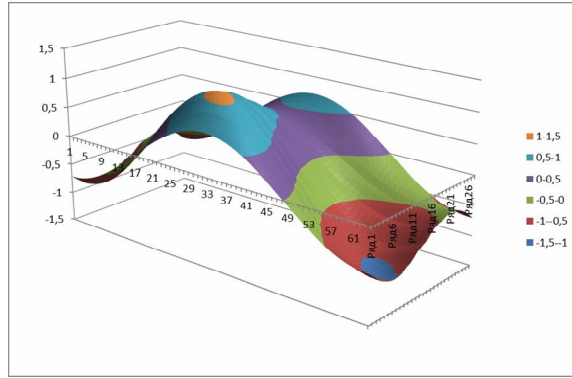


з) $\theta = 5,495$;

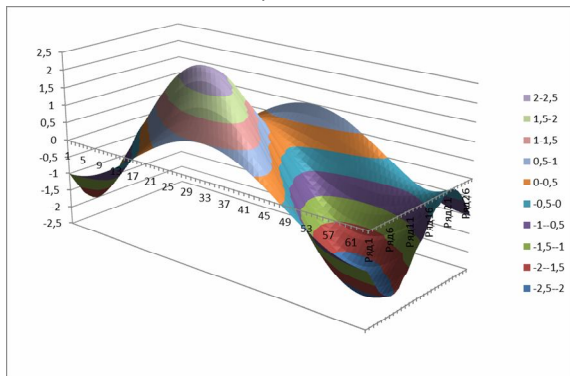
Рис. 2. Влияние угла сдвига фаз θ на проекцию главного вектора сил инерции на ось z



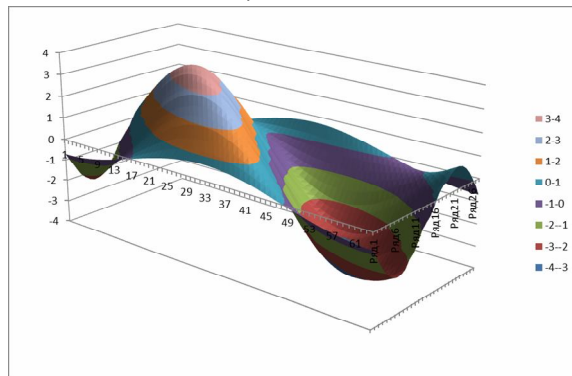
а) $\theta = 0,25$;



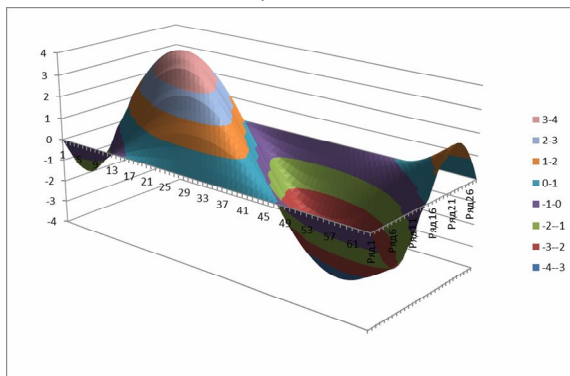
б) $\theta = 0,785$;



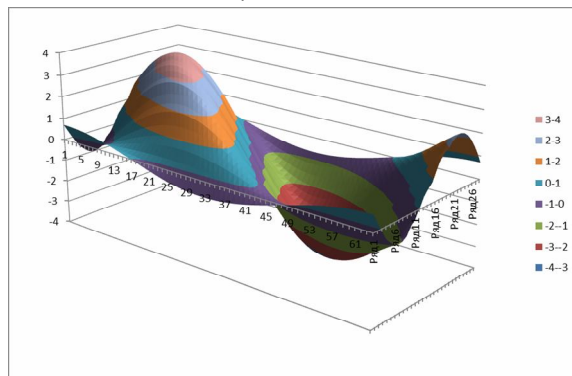
в) $\theta = 1,57$;



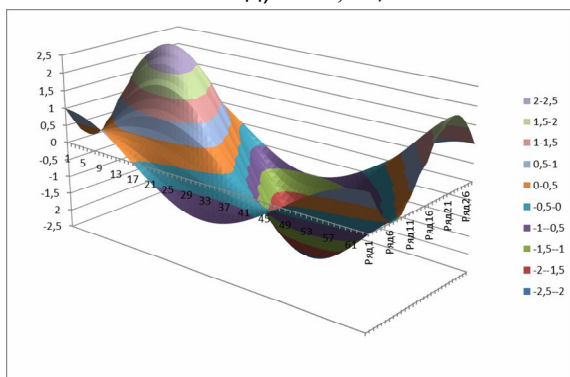
г) $\theta = 2,355$;



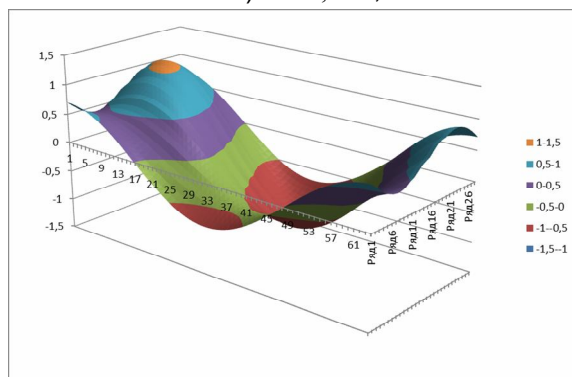
д) $\theta = 3,14$;



е) $\theta = 3,925$;

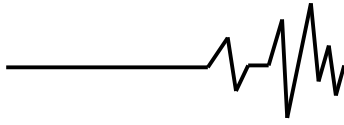


ж) $\theta = 4,71$;



з) $\theta = 5,495$;

Рис. 3. Влияние угла сдвига фаз θ на проекцию главного вектора сил инерции на ось y



$$\sum M_{ix} = -\Phi_1(l+L)\cos(\varphi+\varphi_0)\sin\theta.$$

$$M_o = \sqrt{(\sum M_{ix})^2 + (\sum M_{iy})^2 + (\sum M_{iz})^2}$$

$$M_o = \left(\left(\Phi_1 b \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) - \sin \frac{\theta}{2} \cos(\varphi + \varphi_0) \right) \right)^2 + \right. \\ \left. + (\Phi_1(l+L)\sin(\varphi+\varphi_0)\sin\theta)^2 - (\Phi_1(l+L)\cos(\varphi+\varphi_0) \times \right. \\ \left. \times \sin\theta)^2 \right)^{1/2} =$$

$$= \Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\left(b \left(\sin \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) - \sin \frac{\theta}{2} \cos(\varphi + \varphi_0) \right) \right)^2 + \right. \\ \left. + 4(l+L)^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right)^{1/2}.$$

Определим наименьший главный момент системы сил инерции:

$$M_g = \frac{M_x F_x + M_y F_y + M_z F_z}{F_o}$$

После подстановки всех значений и преобразований, получим (рис.6):

$$M_g = - \frac{2\Phi_1(l+L)\sin\theta \cdot \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \cdot \sin\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} + \frac{\theta}{2}\right)}{\left(\cos^2 \frac{\theta}{2} + 4\sin \frac{\theta}{2} \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \sin\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2}\right)\right)^{1/2}}.$$

Предположим, что наименьший главный момент и главный вектор системы сил не равняются нулю. Тогда система сил инерции приводится к динамическому винту с параметром p (рис.8):

$$p = \frac{M_g}{F_o} = - \frac{2(l+L)\cos \frac{\theta}{2} \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \sin\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} + \frac{\theta}{2}\right)}{\cos^2 \frac{\theta}{2} + 4\sin \frac{\theta}{2} \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \sin\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} + \frac{\theta}{2}\right)}$$

Определим уравнение центральной винтовой оси:

$$\frac{M_x - (yF_z - zF_y)}{F_x} = p;$$

$$\Phi_1 b \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) - \sin \frac{\theta}{2} \cos(\varphi + \varphi_0) \right) - 2\Phi_1 y \sin \frac{\theta}{2} \times \\ \times \left(\cos(\varphi + \varphi_0) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) \right) + 2\Phi_1 z \sin \frac{\theta}{2} \times \\ \times \left(\sin(\varphi + \varphi_0) \sin \frac{\theta}{2} + \cos \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) \right) = 0; \\ \Phi_1 b \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) - \sin \frac{\theta}{2} \cos(\varphi + \varphi_0) \right) = 2\Phi_1 y \times$$

$$\times \sin \frac{\theta}{2} \left(y \left(\sin \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) + \cos(\varphi + \varphi_0) \right) \times \right. \\ \left. \times \sin \frac{\theta}{2} \right) + z \left(\sin(\varphi + \varphi_0) \sin \frac{\theta}{2} + \cos \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) \right); \\ \frac{b}{2} \left(\sin \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) - \sin \frac{\theta}{2} \cos(\varphi + \varphi_0) \right) = y \sin \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) + \\ + z \cos \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) + \sin \frac{\theta}{2} (y \cos(\varphi + \varphi_0) + z \sin(\varphi + \varphi_0));$$

После преобразований получим:

$$\frac{b}{2} \left(\sin \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) - \sin \frac{\theta}{2} \cos(\varphi + \varphi_0) \right) = \cos \frac{\theta}{2} \times \\ \times (y \sin \varphi + z \cos \varphi) + 2 \sin \frac{\theta}{2} \cos \left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} \right) \times \\ \times \left(y \cos \frac{\varphi_0}{2} + z \sin \frac{\varphi_0}{2} \right);$$

$$\frac{M_y - (zF_x - xF_z)}{F_y} = p = \frac{M_z - (xF_y - yF_x)}{F_z};$$

$$\frac{\Phi_1(l+L)\sin(\varphi+\varphi_0)\sin\theta}{-2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin(\varphi+\varphi_0) \sin \frac{\theta}{2} + \cos \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) \right)} + \\ \frac{2\Phi_1 x \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos(\varphi+\varphi_0) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) \right)}{-2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin(\varphi+\varphi_0) \sin \frac{\theta}{2} + \cos \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) \right)} = \\ = \frac{-\Phi_1(l+L)\cos(\varphi+\varphi_0)\sin\theta}{2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos(\varphi+\varphi_0) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) \right)} + \\ \frac{2\Phi_1 x \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin(\varphi+\varphi_0) \sin \frac{\theta}{2} + \cos \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) \right)}{2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos(\varphi+\varphi_0) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \left(\varphi + \frac{\theta}{2} \right) \right)};$$

После простых, но трудоемких преобразований, получим:

$$x = \frac{(l+L)\cos \frac{\theta}{2} \cos \left(2\varphi + \varphi_0 + \frac{\theta}{2} \right)}{1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} + 2 \sin \frac{\theta}{2} \sin \left(2\varphi + \varphi_0 + \frac{\theta}{2} \right)};$$

Выводы.

Проведенные исследования показали широкие возможности блока управляемых дебалансных вибровозбудителей по синтезу нестационарных вибрационных полей. Изменяя угол поворота подвижных дебалансов и угол сдвига фаз, можно получать всевозможные управляемые вибрационные воздействия с изменяющейся структурой силового поля.