



Черевко А.Н.

Черевко П.А.

Полтавський
національний
технічний
університет
ім. Ю. Кондратюка

УДК 621.01

УПРАВЛЯЕМЫЙ СИНТЕЗ ВИБРАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ БЛОКОМ ТРЕХДЕБАЛАНСНЫХ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕЙ

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.

Широкое применение вибрационной техники и технологии дает возможность интенсифицировать большое количество технологических процессов, повысить качество работ, создать новые технологии, которые основываются на вибрационных эффектах [1, 2].

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. Алабушева, И.И. Блехмана, И.И. Быховского, А.П. Бабицева, 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].

Управляемые технологические вибромашины, которые появились в последнее время, имеют необыкновенные сочетания полезных свойств и дают возможность использовать вибротехнику там, где еще совсем недавно это считалось нецелесообразным и малоперспективным. Объединение одновальных трехдебалансных вибровозбудителей в единый блок приводит к существенному расширению спектра генерированных вибрационных полей переменной структуры.

Исследование возможностей генератора колебаний, состоящего из двух трехдебалансных вибровозбудителей, является важной задачей, актуальность которой возрастает в связи с универсальностью привода технологической машины

Рассмотрим работу вибрационного блока состоящего из двух трехдебалансных вибровозбудителей.

В рассматриваемой ниже схеме вибровозбудители синхронизируются 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.

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:

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

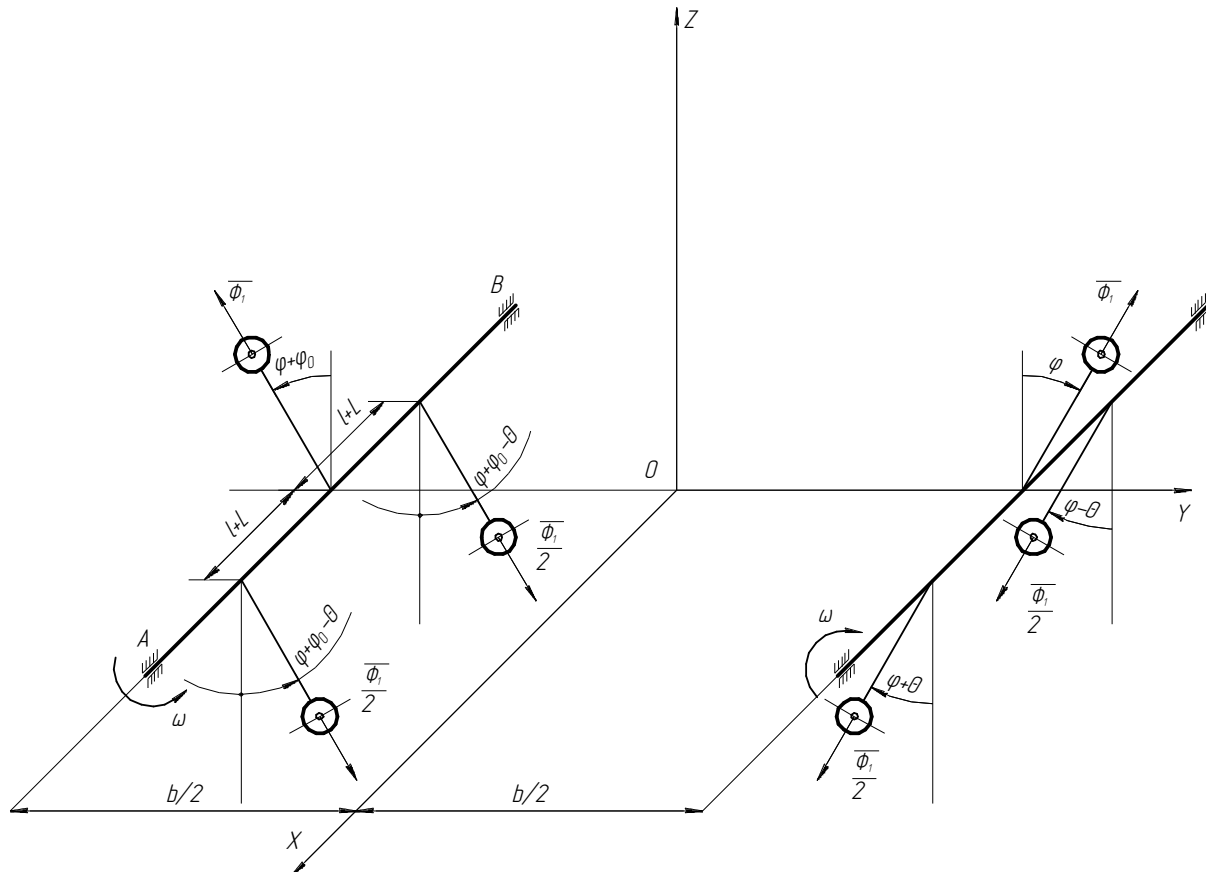
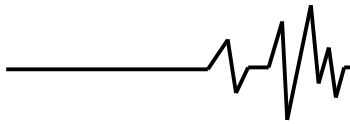


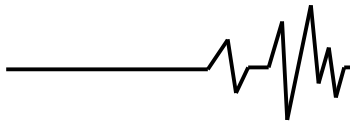
Рис. 1 Расчетная схема блока вибровозбудителей

$$\begin{aligned} \sum F_{ix} &= 0; \\ \sum F_{iy} &= \frac{\Phi_1}{2} \sin(\varphi_0 + \varphi - \theta) - \Phi_1 \sin(\varphi_0 + \varphi) + \Phi_1 \sin \varphi + \\ &+ \frac{\Phi_1}{2} \sin(\varphi + \varphi_0 - \theta) - \frac{\Phi_1}{2} \sin(\varphi - \theta) - \frac{\Phi_1}{2} \sin(\varphi + \theta) = \\ &= \Phi_1 \sin(\varphi_0 + \varphi - \theta) - \Phi_1 \sin(\varphi_0 + \varphi) + \Phi_1 \sin \varphi - \frac{\Phi_1}{2} \times \\ &\times (\sin(\varphi - \theta) + \sin(\varphi + \theta)) = \Phi_1 (\sin(\varphi_0 + \varphi - \theta) - \\ &- \sin(\varphi_0 + \varphi)) + \Phi_1 \sin \varphi - \frac{\Phi_1}{2} \left(2 \sin \frac{\varphi - \theta + \varphi + \theta}{2} \times \right. \\ &\times \left. \cos \frac{\varphi - \theta - \varphi - \theta}{2} \right) = 2\Phi_1 \sin \frac{\varphi_0 + \varphi - \theta - \varphi - \varphi_0}{2} \times \\ &\times \cos \frac{\varphi_0 + \varphi - \theta + \varphi + \varphi_0}{2} + \Phi_1 \sin \varphi - \Phi_1 \sin \varphi \times \\ &\times \cos(-\theta) = 2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin \varphi \sin \frac{\theta}{2} - \cos \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) \right). \\ \sum F_{iz} &= -\frac{\Phi_1}{2} \cos(\varphi + \varphi_0 - \theta) + \Phi_1 \cos(\varphi_0 + \varphi) + \Phi_1 \cos \varphi - \\ &- \frac{\Phi_1}{2} \cos(\varphi + \varphi_0 - \theta) - \frac{\Phi_1}{2} \cos(\varphi + \theta) - \frac{\Phi_1}{2} \cos(\varphi - \theta) = \end{aligned}$$

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

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

$$F_o = \left(\left(2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin \varphi \sin \frac{\theta}{2} - \cos \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) \right) \right)^2 + \right.$$



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

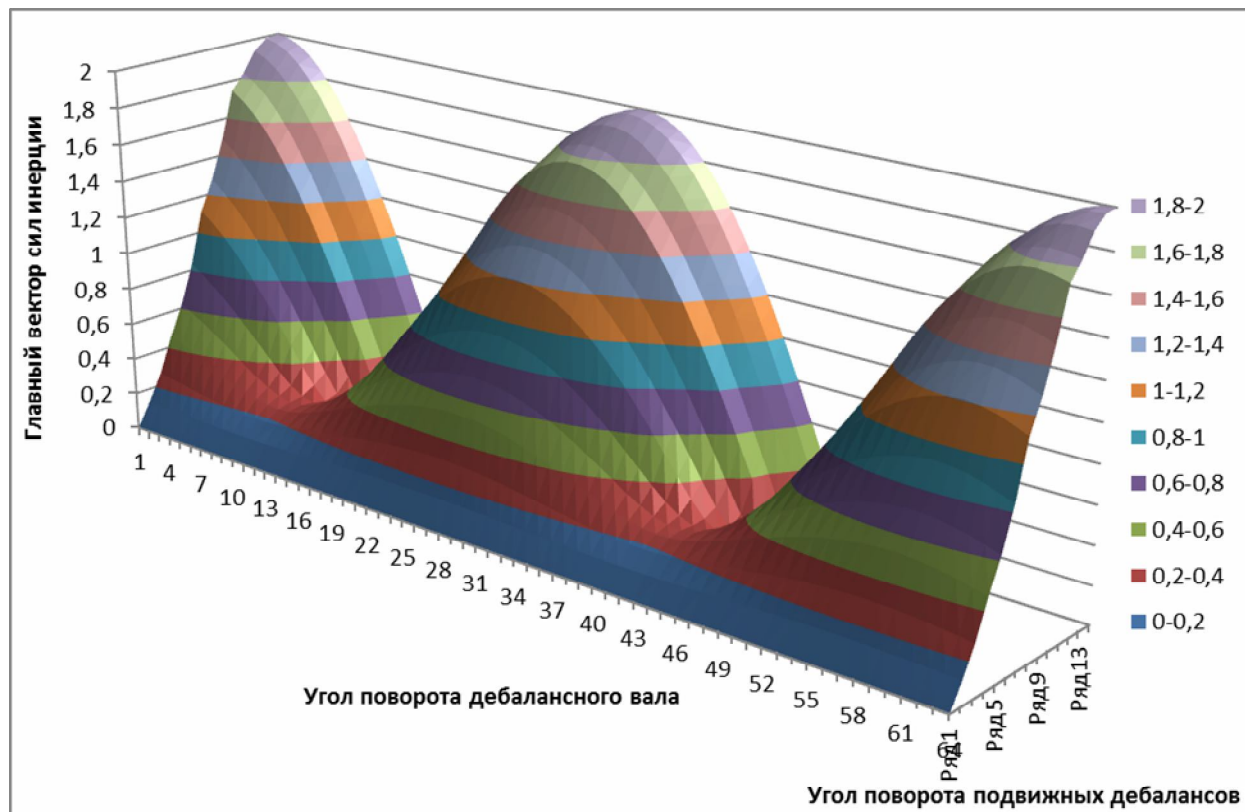


Рис. 2 Зависимость главного вектора сил инерции от угла поворота подвижных дебалансов и дебалансного вала

Определим главный момент сил инерции

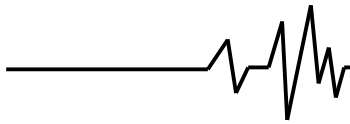
\bar{M}_O .

$$\bar{M}_O = M_x \bar{i} + M_y \bar{j} + M_z \bar{k} ;$$

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

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

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



$$\begin{aligned} \sum M_x &= \frac{\Phi_1}{2}(l+L)\sin(\varphi-\theta) - \frac{\Phi_1}{2}(l+L)\sin(\varphi+\theta) = \\ &= \frac{\Phi_1}{2}(l+L)(\sin(\varphi-\theta) - \sin(\varphi+\theta)) = -\Phi_1(l+L)\cos\varphi\sin\theta. \\ M_o &= \sqrt{(\sum M_x)^2 + (\sum M_y)^2 + (\sum M_z)^2} \\ M_o &= \left[\left(\Phi_1 b \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) + \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi \right) \right)^2 + \right. \\ &+ \left. \left(-\Phi_1(l+L)\sin\varphi\sin\theta \right)^2 + \left(-\Phi_1(l+L)\cos\varphi\sin\theta \right)^2 \right]^{1/2} = \\ &= \Phi_1 \left[\left(b \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) + \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi \right) \right)^2 + \right. \\ &+ \left. (l+L)^2 \sin^2 \theta (\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi) \right]^{1/2} = \\ &= \Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left[\left(b \left(\sin \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) + \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi \right) \right)^2 + \right. \\ &+ \left. 4(l+L)^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right]^{1/2}. \end{aligned}$$

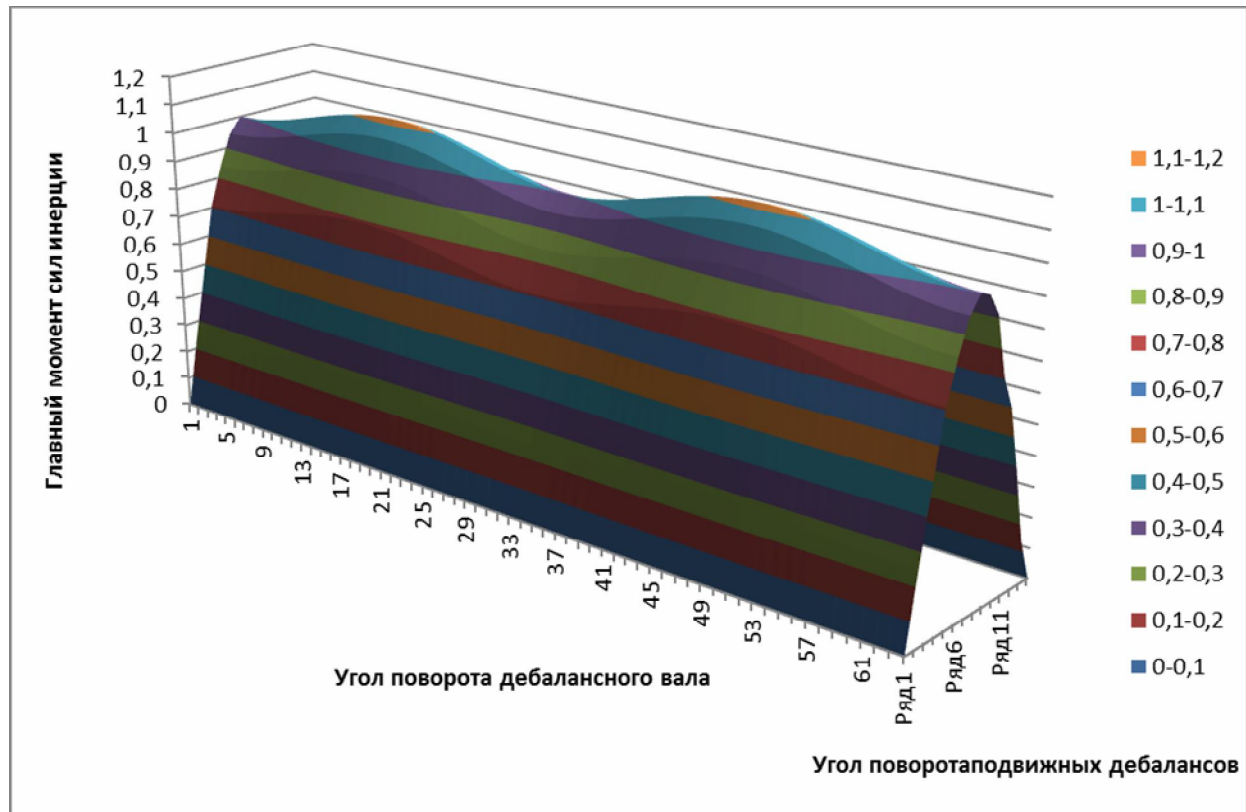


Рис. 3 Зависимость главного момента сил инерции от угла поворота подвижных дебалансов и дебалансного вала

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.4):

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

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.5):

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

Определим уравнение центральной винтовой оси:

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

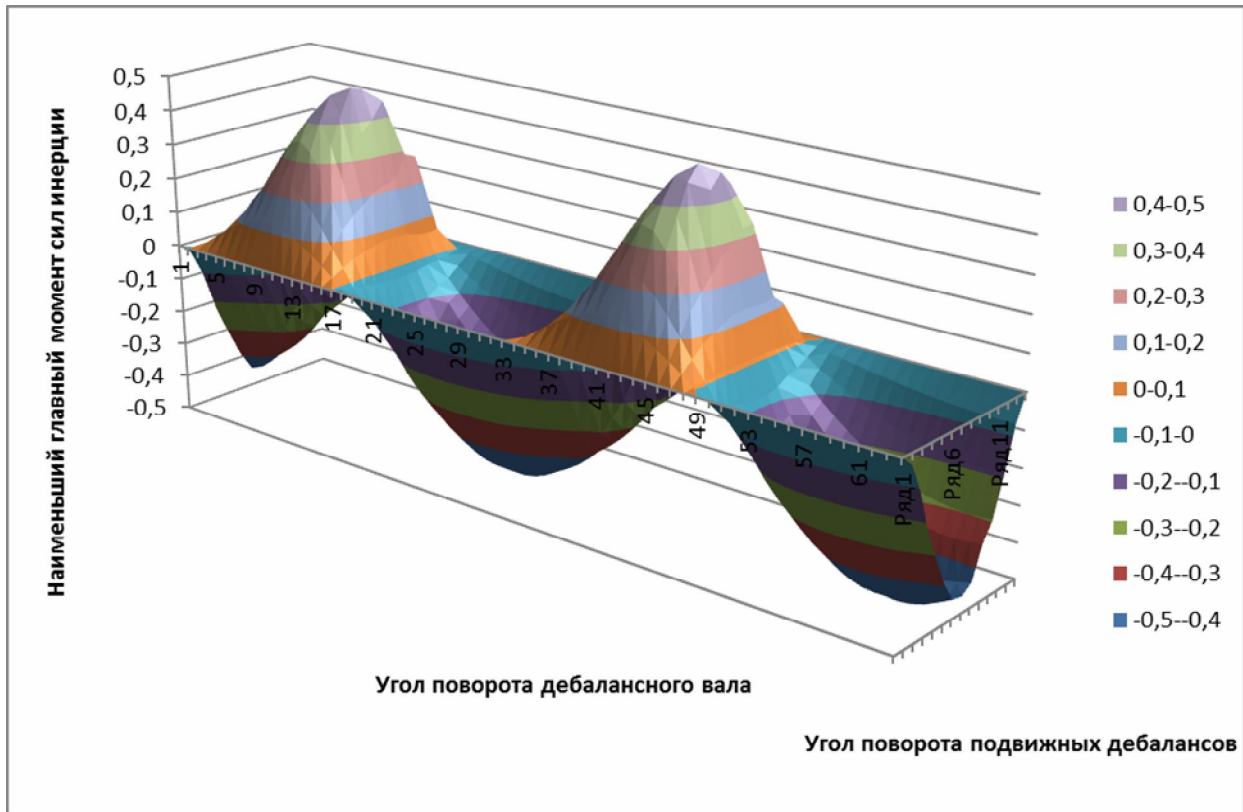
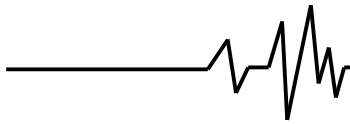


Рис.4 Зависимость наименьшего главного момента сил инерции от угла поворота подвижных дебалансов и дебалансного вала

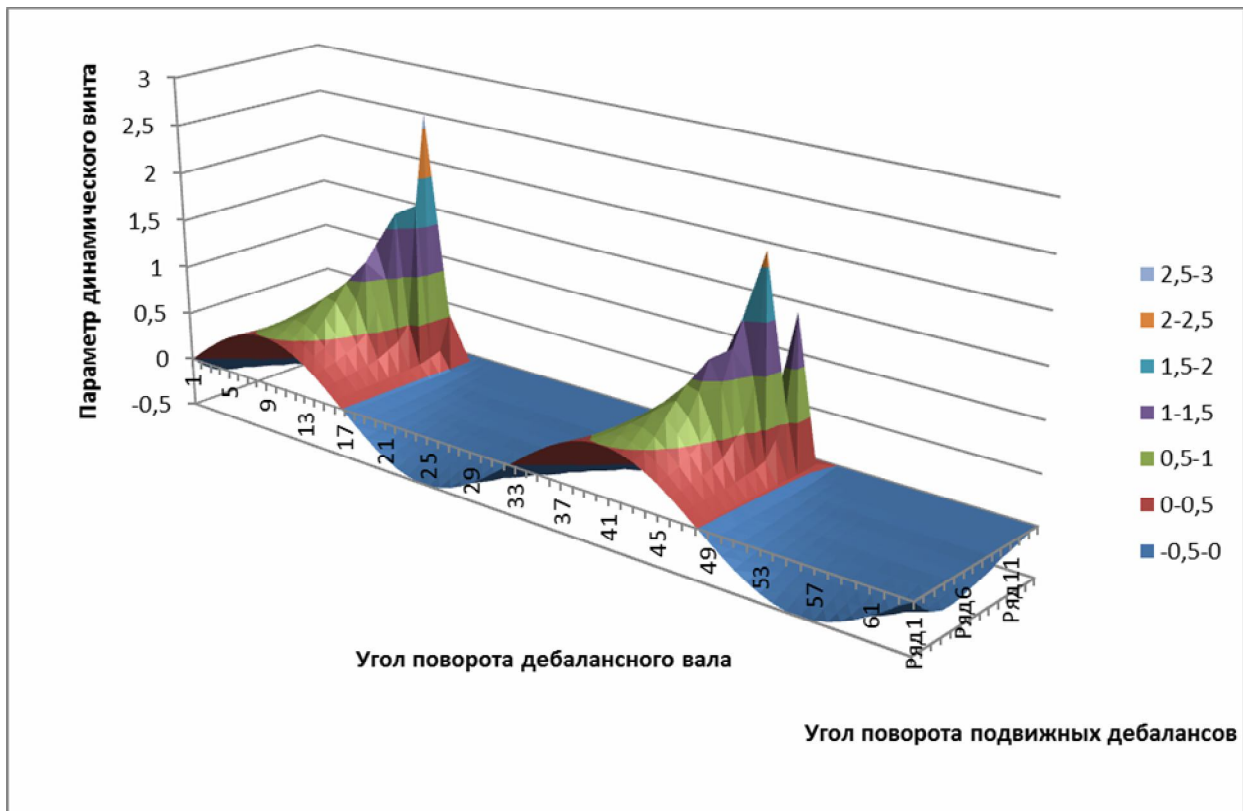
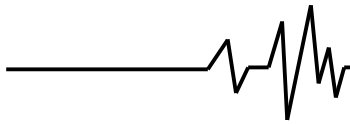


Рис.5 Зависимость параметра динамического винта от угла поворота подвижных дебалансов и дебалансного вала



$$\begin{aligned} & \Phi_1 b \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) + \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi \right) - 2\Phi_1 y \sin \frac{\theta}{2} \times \\ & \times \left(\cos \varphi \sin \frac{\theta}{2} - \sin \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) \right) - 2\Phi_1 z \sin \frac{\theta}{2} \times \\ & \times \left(\sin \varphi \sin \frac{\theta}{2} - \cos \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) \right) = 0; \\ & \Phi_1 b \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) + \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi \right) = 2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \times \\ & \times \left(y \cos \varphi \sin \frac{\theta}{2} - y \sin \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) - \right. \\ & \left. - z \left(\sin \varphi \sin \frac{\theta}{2} - \cos \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) \right) \right); \\ & \frac{b}{2} \left(\sin \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) + \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi \right) = y \left(\cos \varphi \sin \frac{\theta}{2} - \right. \\ & \left. - \sin \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) \right) - z \left(\sin \varphi \sin \frac{\theta}{2} - \cos \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) \right); \\ & \frac{M_y - (zF_x - xF_z)}{F_y} = p; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{-\Phi_1 (l+L) \sin \varphi \sin \theta}{2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin \varphi \sin \frac{\theta}{2} - \cos \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) \right)} + \\ & \frac{2\Phi_1 x \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos \varphi \sin \frac{\theta}{2} - \sin \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) \right)}{2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin \varphi \sin \frac{\theta}{2} - \cos \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) \right)} = \\ & \frac{2(l+L) \cos \frac{\theta}{2} \cos \left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} \right) \sin \left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right)}{\cos^2 \frac{\theta}{2} - 4 \sin \frac{\theta}{2} \cos \left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} \right) \sin \left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right)}; \end{aligned}$$

После простых, но трудоемких преобразований, получим:

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

Установим, когда система сил не приводится к динамическому винту. Это возможно в случае равенства нулю наименьшего главного момента системы сил инерции: $M_g = 0$.

$$\frac{2\Phi_1 (l+L) \sin \theta \cos \left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} \right) \sin \left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right)}{\left(\cos^2 \frac{\theta}{2} - 4 \sin \frac{\theta}{2} \cos \left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} \right) \sin \left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) \right)^{1/2}} = 0.$$

Следовательно:

$$\sin \theta \cos \left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} \right) \sin \left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) = 0.$$

Пускай:

1. $\sin \theta = 0$, тогда: $\theta = 0, \pi$;

а) $\theta = 0$;

$$\begin{aligned} F_o &= 2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos^2 \frac{\theta}{2} - 4 \sin \frac{\theta}{2} \cos \left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} \right) \times \right. \\ & \left. \times \sin \left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) \right)^{1/2} = 0; \\ M_o &= \Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\left(b \left(\sin \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) + \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi \right) \right)^2 + \right. \\ & \left. + 4(l+L)^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right)^{1/2} = 0. \end{aligned}$$

Система сил находится в динамическом равновесии.

б) $\theta = \pi$;

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

Система сил приводится к равнодействующей в новом центре приведения (рис.5). Найдем уравнения линии действия равнодействующей;

$$\begin{aligned} \sum F_y &= 2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin \varphi \sin \frac{\theta}{2} - \cos \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) \right) = \\ & = 2\Phi_1 \sin \frac{\pi}{2} \left(\sin \varphi \sin \frac{\pi}{2} - \cos \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\pi}{2} \right) \right) = \\ & = 2\Phi_1 (\sin \varphi - \sin(\varphi + \varphi_0)) = -4\Phi_1 \cos \left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} \right) \sin \frac{\varphi_0}{2}; \\ \sum F_z &= 2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos \varphi \sin \frac{\theta}{2} - \sin \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) \right) = \\ & = 2\Phi_1 \sin \frac{\pi}{2} \left(\cos \varphi \sin \frac{\pi}{2} - \sin \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\pi}{2} \right) \right) = \\ & = 2\Phi_1 (\cos \varphi + \cos(\varphi + \varphi_0)) = 4\Phi_1 \cos \left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2} \right) \cos \frac{\varphi_0}{2}; \end{aligned}$$

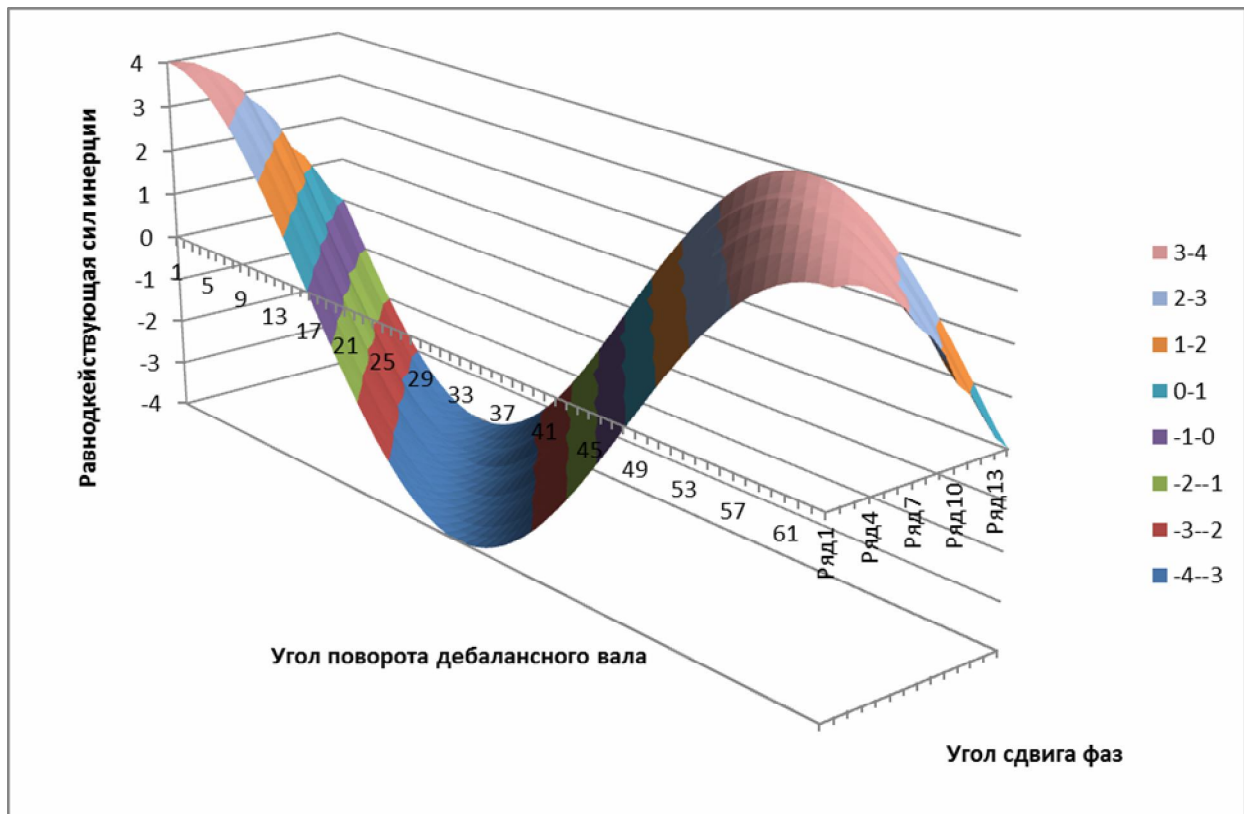
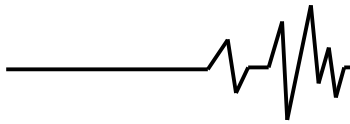


Рис.5 Зависимость равнодействующей сил инерции от угла поворота дебалансного вала и угла сдвига фаз

$$\sum M_{iy} = -\Phi_1(l+L)\sin\varphi\sin\theta = -\Phi_1(l+L)\sin\varphi\sin\pi = 0;$$

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

$$M_x - (yF_z - zF_y) = 0$$

$$2\Phi_1 b \sin\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \sin\frac{\varphi_0}{2} - \left(4\Phi_1 y \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \cos\frac{\varphi_0}{2} +\right.$$

$$\left. + 4\Phi_1 z \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \sin\frac{\varphi_0}{2}\right) = 0;$$

$$2\Phi_1 b \sin\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \sin\frac{\varphi_0}{2} = 4\Phi_1 \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \times$$

$$\times \left(y \cos\frac{\varphi_0}{2} + z \sin\frac{\varphi_0}{2}\right);$$

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

$$M_y - (zF_x - xF_z) = 0.$$

$$0 + 4\Phi_1 x \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \cos\frac{\varphi_0}{2} = 0;$$

$$x \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \cos\frac{\varphi_0}{2} = 0.$$

$$M_z - (xF_y - yF_x) = 0.$$

$$0 - x \left(-4\Phi_1 \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \sin\frac{\varphi_0}{2}\right) = 0;$$

$$x \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \sin\frac{\varphi_0}{2} = 0.$$

Таким образом, необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} x \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \cos\frac{\varphi_0}{2} = 0 \\ x \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) \sin\frac{\varphi_0}{2} = 0 \end{cases};$$

Возможны два случая:

а) $x = 0;$

б) $\cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) = 0.$

Однако в этом случае $F_o = 4\Phi_1 \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) = 0$ и система сил инерции приводится к паре сил с моментом

$$M_o = 2\Phi_1 b \sin\frac{\varphi_0}{2} \text{ (рис.6).}$$

II. $\cos\left(\varphi + \frac{\varphi_0}{2}\right) = 0; \varphi + \frac{\varphi_0}{2} = \frac{\pi}{2} + n\pi;$

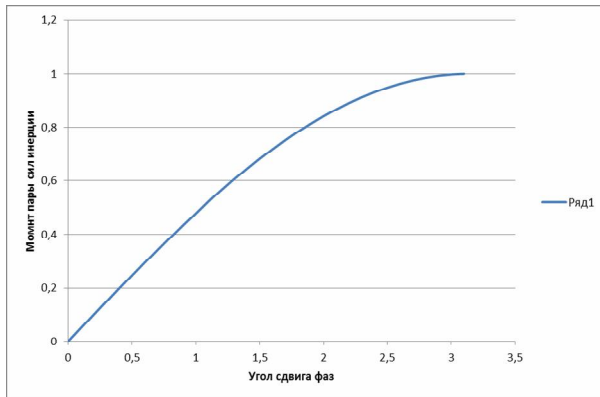
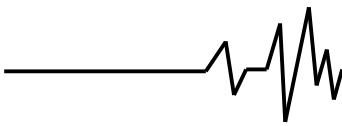


Рис.6 Зависимость момента пары сил инерции от угла сдвига фаз

а) $\varphi + \frac{\varphi_0}{2} = \frac{\pi}{2}; \quad \varphi = \frac{\pi}{2} - \frac{\varphi_0}{2};$

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

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

В этом случае система сил приводится к равнодействующей. Определим уравнения линии действия этой равнодействующей.

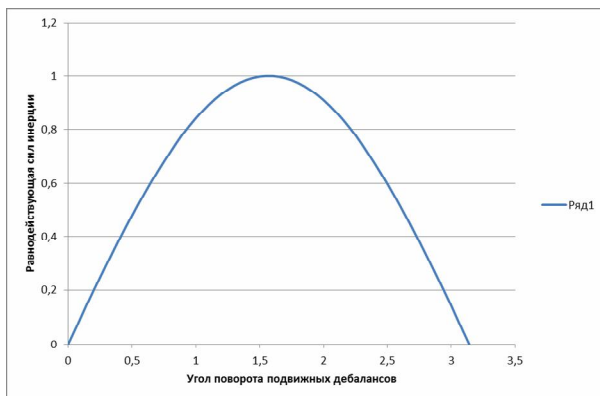
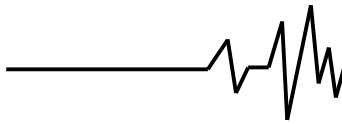


Рис.7 Зависимость равнодействующей сил инерции от угла поворота подвижных дебалансов

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

$$\begin{aligned} &= 2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos \frac{\varphi_0}{2} \sin \frac{\theta}{2} + \sin \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) \right); \\ \sum F_{iz} &= 2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos \varphi \sin \frac{\theta}{2} - \sin \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) \right) = \\ &= 2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos \varphi \sin \frac{\theta}{2} - \sin \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) \right) = \\ &= 2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin \frac{\varphi_0}{2} \sin \frac{\theta}{2} - \cos \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) \right); \\ \sum M_{ix} &= \Phi_1 b \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin \left(\varphi + \varphi_0 - \frac{\theta}{2} \right) + \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi \right) = \\ &= \Phi_1 b \sin \frac{\theta}{2} \left(\sin \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) + \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi \right) = \\ &= \Phi_1 b \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) + \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi \right); \\ \sum M_{iy} &= -\Phi_1 (l+L) \sin \varphi \sin \theta = -\Phi_1 (l+L) \times \\ &\times \sin \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\varphi_0}{2} \right) \sin \theta = -\Phi_1 (l+L) \cos \frac{\varphi_0}{2} \sin \theta; \\ \sum M_{iz} &= -\Phi_1 (l+L) \cos \varphi \sin \theta = -\Phi_1 (l+L) \times \\ &\times \cos \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\varphi_0}{2} \right) \sin \theta = -\Phi_1 (l+L) \sin \frac{\varphi_0}{2} \sin \theta. \\ M_x - (yF_z - zF_y) &= 0 \\ \Phi_1 b \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) + \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi \right) &= \Phi_1 b \sin \frac{\theta}{2} \times \\ &\times \left(\cos \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\varphi_0}{2} \right); \\ \Phi_1 b \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\varphi_0}{2} \right) &- 2\Phi_1 y \sin \frac{\theta}{2} \times \\ &\times \left(\sin \frac{\varphi_0}{2} \sin \frac{\theta}{2} - \cos \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) \right) + 2\Phi_1 z \sin \frac{\theta}{2} \times \\ &\times \left(\cos \frac{\varphi_0}{2} \sin \frac{\theta}{2} + \sin \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) \right) = 0; \\ \Phi_1 b \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\varphi_0}{2} \right) &= 2\Phi_1 \sin \frac{\theta}{2} (y \times \\ &\times \left(\sin \frac{\varphi_0}{2} \sin \frac{\theta}{2} - \cos \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) \right) - \\ &- z \left(\cos \frac{\varphi_0}{2} \sin \frac{\theta}{2} + \sin \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) \right)); \\ \frac{b}{2} \left(\cos \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\varphi_0}{2} \right) &= y \left(\sin \frac{\varphi_0}{2} \sin \frac{\theta}{2} - \right. \\ &\left. - \cos \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) \right) - z \left(\cos \frac{\varphi_0}{2} \sin \frac{\theta}{2} + \sin \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) \right); \end{aligned}$$



Учитывая то, что:

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

Получим:

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

$$M_y - (zF_x - xF_z) = 0;$$

$$-\Phi_1(l+L) \cos \frac{\varphi_0}{2} \sin \theta + 2\Phi_1 x \sin \frac{\theta}{2} \times$$

$$\times \left(\sin \frac{\varphi_0}{2} \sin \frac{\theta}{2} - \cos \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) \right) = 0;$$

$$-\Phi_1(l+L) \cos \frac{\varphi_0}{2} \sin \theta = -2\Phi_1 x \sin \frac{\theta}{2} \times$$

$$\times \left(\sin \frac{\varphi_0}{2} \sin \frac{\theta}{2} - \cos \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\theta}{2} \right) \right);$$

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

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

$$= \frac{(l+L) \cos \frac{\varphi_0}{2} \cos \frac{\theta}{2}}{\sin \frac{\varphi_0}{2} \sin \frac{\theta}{2} - \cos \frac{\varphi_0}{2} \cos \frac{\theta}{2} - \sin \frac{\varphi_0}{2} \sin \frac{\theta}{2}} =$$

$$= \frac{(l+L) \cos \frac{\varphi_0}{2} \cos \frac{\theta}{2}}{-\cos \frac{\varphi_0}{2} \cos \frac{\theta}{2}} = -(l+L);$$

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 по структуре управляемые вибрационные воздействия, причем структура поля изменяется в процессе управления подвижными дебалансами. Все это дает возможность говорить о вибрационном блоке управляемых вибровозбудителей, как об универсальном приводе технологической машины.

Литература

1. Сердюк Л.И. Основы теории, расчет и конструирование управляемых вибрационных машин с дебалансными возбудителями: автореф. дис. докт. техн. наук / Л.И. Сердюк; ХПИ.– Харьков, 1991.– 48 с.
2. Блехман И.И. Что может вибрация? О «вибрационной механике» и вибрационной технике / И.И. Блехман. – М.: Наука, 1988. – 208 с.
3. Диминтберг Ф.М. Вибрация в технике и человек / Ф.М. Диминтберг, К.В. Фролов. – М.: Знание, 1987. – 160 с.
4. Вибрации в технике: справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1981. – Т.4. Вибрационные процессы и машины / под ред. Э.Э. Лавендела, 1981. – 509 с.
5. Гончаревич И.Ф. Теория вибрационной техники и технологии. / И.Ф. Гончаревич, К.В. Фролов. – М.: Наука, 1981. – 320 с.
6. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний / Я.Г. Пановко. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
7. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов-н/Д.: ДГТУ, 1999. – 620 с.