Черевко А. Н.

Хероим Е. А.

Черевко П. А.

Полтавский национальный технический университет им. Ю. Кондратюка

УДК 621.01

ВЛИЯНИЕ КОРИОЛИСОВОЙ СИЛЫ ИНЕРЦИИ НА ДИНАМИКУ БЛОКА УПРАВЛЯЕМЫХ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕЙ

Обговорюються питання, пов'язані з оцінюванням динамічних можливостей вібраційних машин з керованими тридебалансними віброзбуджувачами з урахуванням коріолісової сили інерції.

The problems, bound with an estimation of dynamic capabilities of vibrational machines with controllabe unbalanced masses with the considering koriolisovoyi force of inertia.

Постановка проблемы. Вибрационная техника широко используется в народном хозяйстве нашей страны. Это металургия, строительство, добыча полезных ископаемых, транспортировка. Во всех случаях применения вибрации учитывается рациональность применения тех или иных вибрационных полей, а также их структура. Исследование влияния кориолисовых сил инерции 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 вибромашины, 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 одновальных трехдебалансных вибровозбудителей приводит к существенному расширению спектра генерирования вибрационных полей переменной структуры.

Цель работы. Исследование влияния кориолисовой силы инерции генератора колебаний, состоящего из двух одновальных управляемых трехдебалансных вибровозбудителей, на структуру силового поля.

Изложение основного материала. Сложность движения обрабатываемой среды полностью определяется движением рабочего органа, на который загружается эта среда. Преобладающее большинство исследователей и конструкторов для достижения поставленной цели устанавливают на рабочем органе машины несколько вибровозбудителей, которые генерируют возмущающие силы различных направлений. Иногда это позволяет достичь необходимой цели. Однако очень часто совместная работа установленных вибровозбудителей отрицательно влияет на каждый из них, способствуя выходу их из строя. Особой интенсификации технологического процесса не наблюдается, а вот расход электрической энергии существенно возрастает.

Рационально подобранные рабочие параметры вибрационных машин 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.

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.

Ранее проведенные теоретические исследования динамики блока управляемых вибровозбудителей показали, что при его работе возможны все случаи силового возмущения среды [8]. Из курса теоретической механики известно, что любая совокупность сил, приложенных к абсолютно твердому телу, приводится в общем случае к динамическому винту [9]. Под действием силового винта тело будет совершать винтовые колебания, параметры которых будут определяться параметрами динамического винта.

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.

Составим математическую модель движения блока вибровозбудителей, используя в качестве подвижной системы координат вибрационные оси, которые впервые были использованы проф. Сердюком Л.И. при исследовании движения вибрационной машины с вибровозбудителем винтовых колебаний [1].

Дебалансные валы блока вибровозбудителей поворачиваются: в плоскости xoy на угол α с угловой скоростью $\dot{\alpha}$, в плоскости xoz на угол β с угловой скоростью $\dot{\beta}$, в плоскости yoz на угол ψ с угловой скоростью $\dot{\psi}$.

Сложное движение дебалансов разложим на переносное движение вместе с рабочим органом и их движение относительно рабочего органа. Переносное движение тоже есть сложным. Оно состоит из поступательного движения вместе с началом координат o и из сферического движения относительно точки o, которое характеризуется поворотами на углы α и β относительно соответствующих осей. Относительное движение дебалансов состоит из вращения относительно оси дебалансного вала с угловой скоростью $\dot{\varphi}_1$, угловых колебаний с частотой $\dot{\psi}$, а для подвижных дебалансов учитываем их поворот относительно неподвижного с угловой скоростью $\dot{\theta}$ и перемещение вдоль дебалансного вала со скоростью $v_1 = \lambda \cdot \dot{\theta}$ или $v_1 = \dfrac{h}{2\pi} \cdot \dot{\theta}$, где h – шаг винтовых канавок на дебалансном валу.

Относительная угловая скорость вращения дебалансов будет определяться по формуле:

$$\dot{\varphi} = \pm\dot{\varphi}_1 \pm \dot{\psi} \pm \dot{\theta} \tag{1}$$

Рассмотрим i - ую элементарную частицу дебаланса m_i, положение которой определяется радиусом-вектором

$$\overline{r_i} = x_i \cdot \overline{i} + y_i \cdot \overline{j} + z_i \cdot \overline{k} \tag{2}$$

Кориолисовая сила инерции этой частицы будет определяться по формуле:

$$\overline{\Phi}_{ci} = 2m_i \cdot \overline{v}_{ri} \times \overline{\omega}_e \tag{3}$$

где: $\overline{v}_{ri}$ – относительная скорость рассматриваемой частицы;

$\overline{\omega}_e$ – переносная угловая скорость дебаланса.

С учетом ранее принятых обозначений $\overline{v}_{ri}$ и $\overline{\omega}_e$ можно определить следующими зависимостями:

$$\overline{v}_{ri} = \dot{\varphi}\overline{i} \times \overline{r_i} + \lambda\dot{\theta}\overline{i} \tag{4}$$

$$\overline{\omega}_e = \dot{\beta}\overline{j} + \dot{\alpha}\overline{k} \tag{5}$$

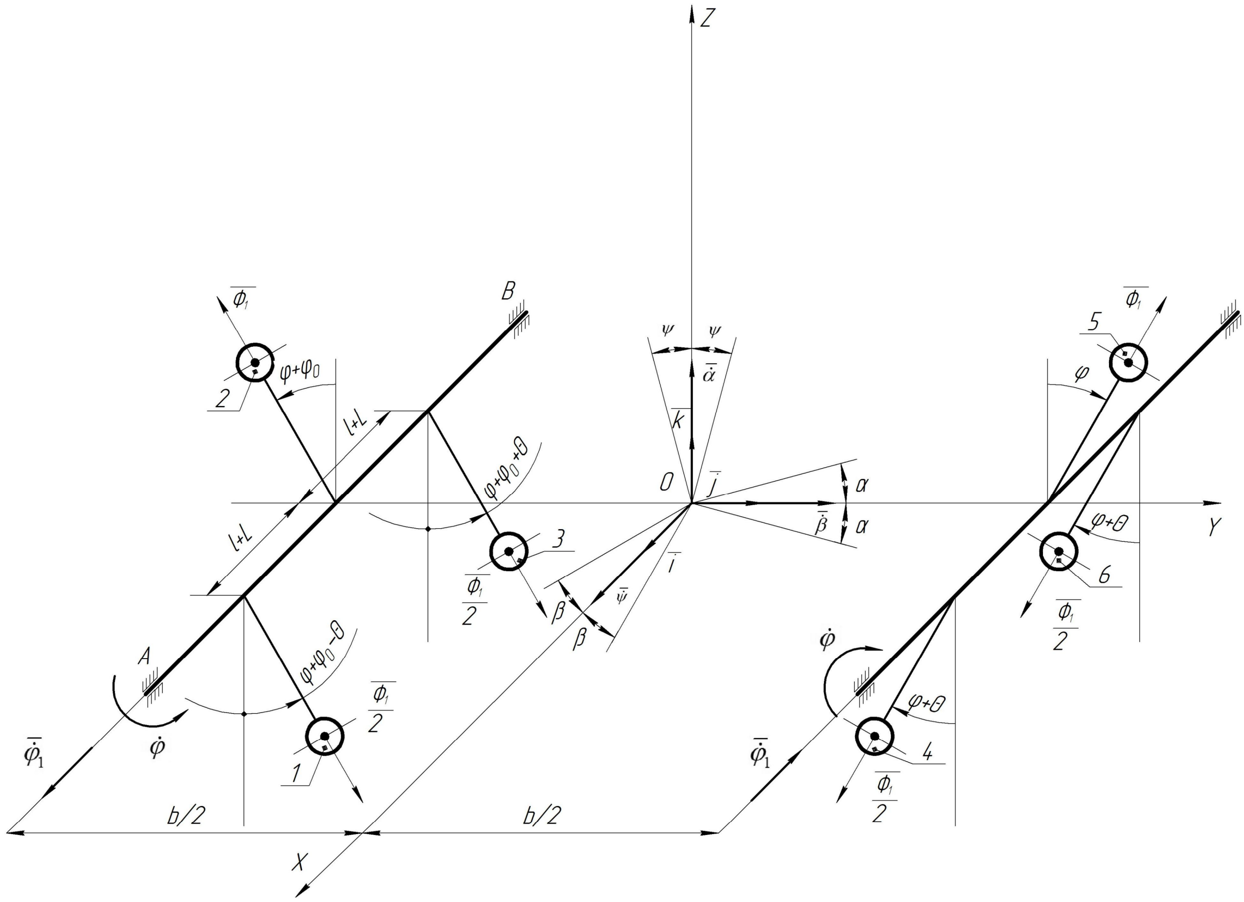

Рис. 1. Расчетная схема блока вибровозбудителей

Подставим их в (3) и в результате получим:

$$\overline{\Phi}_{ci}=2m_i\left(\dot{\varphi}\overline{i}\times\overline{r_i}+\lambda\dot{\theta}\overline{i}\right)\times\left(\dot{\beta}\overline{j}+\dot{\alpha}\overline{k}\right)=$$

$$=2m_i\left(\dot{\varphi}\overline{i}\times\overline{r}\times\dot{\beta}\overline{j}+\dot{\varphi}\overline{i}\times\overline{r_i}\times\dot{\alpha}\overline{k}+\lambda\dot{\theta}\overline{i}\times\dot{\beta}\overline{j}+\right.$$

$$\left.+\lambda\dot{\theta}\overline{i}\times\dot{\alpha}\overline{k}\right).$$

Учитывая то, что:

$$\dot{\varphi}\overline{i}\times\overline{r_i}=\dot{\varphi}\overline{i}\times\left(x_i\overline{i}+y_i\overline{j}+z_i\overline{k}\right)=\dot{\varphi}\overline{i}\times x_i\overline{i}+$$

$$+\dot{\varphi}\overline{i}\times y_i\overline{j}+\dot{\varphi}\overline{i}\times z_i\overline{k}=\dot{\varphi}y_i\overline{k}-\dot{\varphi}z_i\overline{j};$$

$$\dot{\varphi}\overline{i}\times\overline{r}\times\dot{\beta}\overline{j}=\left(\dot{\varphi}y_i\overline{k}-\dot{\varphi}z_i\overline{j}\right)\times\dot{\beta}\overline{j}=\dot{\varphi}y_i\overline{k}\times$$

$$\times\dot{\beta}\overline{j}-\dot{\varphi}z_i\overline{j}\times\dot{\beta}\overline{j}=\dot{\varphi}y_i\dot{\beta}\left(\overline{k}\times\overline{j}\right)-\dot{\varphi}z_i\dot{\beta}\left(\overline{j}\times\right.$$

$$\left.\times\overline{j}\right)=-\dot{\varphi}y_i\dot{\beta}\overline{i};$$

$$\dot{\varphi}\overline{i}\times\overline{r_i}\times\dot{\alpha}\overline{k}=\left(\dot{\varphi}y_i\overline{k}-\dot{\varphi}z_i\overline{j}\right)\times\dot{\alpha}\overline{k}=\dot{\varphi}y_i\overline{k}\times$$

$$\times\dot{\alpha}\overline{k}-\dot{\varphi}z_i\overline{j}\times\dot{\alpha}\overline{k}=\dot{\varphi}y_i\dot{\alpha}\left(\overline{k}\times\overline{k}\right)-\dot{\varphi}z_i\dot{\alpha}\left(\overline{j}\times\right.$$

$$\left.\times\overline{k}\right)=-\dot{\varphi}z_i\dot{\alpha}\overline{i};$$

$$\lambda\dot{\theta}\overline{i}\times\dot{\beta}\overline{j}=\lambda\dot{\theta}\dot{\beta}\left(\overline{i}\times\overline{j}\right)=\lambda\dot{\theta}\dot{\beta}\overline{k};$$

$$\lambda\dot{\theta}\overline{i}\times\dot{\alpha}\overline{k}=\lambda\dot{\theta}\dot{\alpha}\left(\overline{i}\times\overline{k}\right)=-\lambda\dot{\theta}\dot{\alpha}\overline{j}.$$

$$\overline{\Phi}_{ci}=2m_i\left(-\dot{\varphi}y_i\dot{\beta}\overline{i}-\dot{\varphi}z_i\dot{\alpha}\overline{i}+\lambda\dot{\theta}\dot{\beta}\overline{k}-\lambda\dot{\theta}\dot{\alpha}\overline{j}\right)=$$

$$=2m_i\left(-\dot{\varphi}\overline{i}\left(y_i\dot{\beta}+z_i\dot{\alpha}\right)+\lambda\dot{\theta}\left(\dot{\beta}\overline{k}-\dot{\alpha}\overline{j}\right)\right)\tag{6}$$

Определим кориолисовую силу инерции каждого дебаланса, как сумму элементарных сил инерции $\overline{\Phi}_{ci}$:

$$\overline{\Phi}_c=\sum 2m_i\left(-\dot{\varphi}\overline{i}\left(y_i\dot{\beta}+z_i\dot{\alpha}\right)+\lambda\dot{\theta}\left(\dot{\beta}\overline{k}-\dot{\alpha}\overline{j}\right)\right)=$$

$$=-2\sum m_i\dot{\varphi}y_i\dot{\beta}\overline{i}-2\sum m_i\dot{\varphi}z_i\dot{\alpha}\overline{i}+2\sum m_i\lambda\dot{\theta}\times$$

$$\times\left(\dot{\beta}\overline{k}-\dot{\alpha}\overline{j}\right)=-2\sum m_iy_i\dot{\varphi}\dot{\beta}\overline{i}-2\sum m_iz_i\dot{\varphi}\dot{\alpha}\overline{i}+$$

$$+2\sum m_i\lambda\dot{\theta}\left(\dot{\beta}\overline{k}-\dot{\alpha}\overline{j}\right).\tag{7}$$

Учитывая то, что:

$$y_c=\frac{\sum m_iy_i}{m};\qquad z_c=\frac{\sum m_iz_i}{m}$$

$$\overline{\Phi}_c=-2my_c\dot{\varphi}\dot{\beta}\overline{i}-2mz_c\dot{\varphi}\dot{\alpha}\overline{i}+2m\lambda\dot{\theta}\times$$

$$\times\left(\dot{\beta}\overline{k}-\dot{\alpha}\overline{j}\right)=-2m\dot{\varphi}\overline{i}\left(y_c\dot{\beta}+z_c\dot{\alpha}\right)+$$

$$+2m\lambda\dot{\theta}\left(\dot{\beta}\overline{k}-\dot{\alpha}\overline{j}\right). \qquad (8)$$

При определении относительной скорости подвижного дебаланса ее составляющую $\lambda\dot{\theta}$ вдоль оси дебалансного вала принимаем направленной в сторону положительных значений координаты x. Если подвижных дебалансов четыре, то для двух из них вторая составляющая в зависимости (8) будет со знаком "плюс", а для двух других – со знаком "минус". Тогда общее значение зависимости (8) будет иметь вид:

$$\overline{\Phi}_c=-2m\dot{\varphi}\overline{i}\left(y_c\dot{\beta}+z_c\dot{\alpha}\right) \qquad (9)$$

Определим координаты центров масс всех шести дебалансов блока вибровозбудителей:

первый дебаланс

$$y_{c1}=-\frac{b}{2}+e\sin\left(\varphi+\varphi_0-\theta\right);$$

$$z_{c1}=-e\cos\left(\varphi+\varphi_0-\theta\right);$$

второй дебаланс

$$y_{c2}=-\frac{b}{2}-e\sin\left(\varphi+\varphi_0\right);$$

$$z_{c2}=e\cos\left(\varphi+\varphi_0\right);$$

третий дебаланс

$$y_{c3}=-\frac{b}{2}+e\sin\left(\varphi+\varphi_0+\theta\right);$$

$$z_{c3}=-e\cos\left(\varphi+\varphi_0+\theta\right);$$

четвертый дебаланс

$$y_{c4}=\frac{b}{2}-e\sin\left(\varphi+\theta\right);$$

$$z_{c4}=-e\cos\left(\varphi+\theta\right);$$

пятый дебаланс

$$y_{c5}=\frac{b}{2}+e\sin\varphi;$$

$$z_{c5}=e\cos\varphi;$$

шестой дебаланс

$$y_{c6}=\frac{b}{2}-e\sin\left(\varphi+\theta\right);$$

$$z_{c6}=-e\cos\left(\varphi+\theta\right);$$

Подставим в (9) эти значения координат и соответствующие массы дебалансов и определим кориолисовую силу инерции вибровозбудителя;

$\frac{m}{2}$ – масса подвижного дебаланса;

m – масса неподвижного дебаланса;

$$\overline{\Phi}_{c1}=-2\frac{m}{2}\dot{\varphi}\overline{i}\left(\left(-\frac{b}{2}+e\sin\left(\varphi+\varphi_0-\theta\right)\right)\dot{\beta}-\right.$$
$$\left.-e\cos\left(\varphi+\varphi_0-\theta\right)\dot{\alpha}\right);$$

$$\overline{\Phi}_{c2}=-2m\dot{\varphi}\overline{i}\left(\left(-\frac{b}{2}-e\sin\left(\varphi+\varphi_0\right)\right)\dot{\beta}+\right.$$
$$\left.+e\cos\left(\varphi+\varphi_0\right)\dot{\alpha}\right);$$

$$\overline{\Phi}_{c3}=-2\frac{m}{2}\dot{\varphi}\overline{i}\left(\left(-\frac{b}{2}+e\sin\left(\varphi+\varphi_0+\theta\right)\right)\dot{\beta}-\right.$$
$$\left.-e\cos\left(\varphi+\varphi_0+\theta\right)\dot{\alpha}\right);$$

$$\overline{\Phi}_{c4}=-2\frac{m}{2}\dot{\varphi}\overline{i}\left(\left(\frac{b}{2}-e\sin\left(\varphi+\theta\right)\right)\dot{\beta}-\right.$$
$$\left.-e\cos\left(\varphi+\theta\right)\dot{\alpha}\right);$$

$$\overline{\Phi}_{c5}=-2m\dot{\varphi}\overline{i}\left(\left(\frac{b}{2}+e\sin\varphi\right)\dot{\beta}+e\cos\varphi\dot{\alpha}\right);$$

$$\overline{\Phi}_{c6}=-2\frac{m}{2}\dot{\varphi}\overline{i}\left(\left(\frac{b}{2}-e\sin\left(\varphi+\theta\right)\right)\dot{\beta}-\right.$$
$$\left.-e\cos\left(\varphi+\theta\right)\dot{\alpha}\right);$$

$$\overline{\Phi}_c=-m\dot{\varphi}\overline{i}\left(-\frac{b}{2}\dot{\beta}+e\dot{\beta}\sin\left(\varphi+\varphi_0-\theta\right)-e\times\right.$$
$$\times\cos\left(\varphi+\varphi_0-\theta\right)\dot{\alpha}-2\frac{b}{2}\dot{\beta}-2e\dot{\beta}\sin\left(\varphi+\varphi_0\right)+$$
$$+2e\cos\left(\varphi+\varphi_0\right)\dot{\alpha}-\frac{b}{2}\dot{\beta}+e\dot{\beta}\sin\left(\varphi+\varphi_0+\theta\right)-$$
$$-e\cos\left(\varphi+\varphi_0+\theta\right)\dot{\alpha}+\frac{b}{2}\dot{\beta}-e\dot{\beta}\sin\left(\varphi+\theta\right)-$$
$$-e\cos\left(\varphi+\theta\right)\dot{\alpha}+2\frac{b}{2}\dot{\beta}+2e\dot{\beta}\sin\varphi+2e\times$$
$$\times\cos\varphi\dot{\alpha}+\frac{b}{2}\dot{\beta}-e\dot{\beta}\sin\left(\varphi+\theta\right)-e\cos\left(\varphi+\theta\right)\times$$
$$\left.\times\dot{\alpha}\right)=-m\dot{\varphi}\overline{i}\left(e\dot{\beta}\left(\sin\left(\varphi+\varphi_0-\theta\right)-\right.\right.$$
$$-2\sin\left(\varphi+\varphi_0\right)+\sin\left(\varphi+\varphi_0+\theta\right)-\sin\left(\varphi+\theta\right)+$$
$$\left.+2\sin\varphi-\sin\left(\varphi+\theta\right)\right)-e\dot{\alpha}\left(\cos\left(\varphi+\varphi_0-\theta\right)-\right.$$
$$-2\cos\left(\varphi+\varphi_0\right)+\cos\left(\varphi+\varphi_0+\theta\right)+\cos\left(\varphi+\theta\right)-$$
$$\left.\left.-2\cos\varphi+\cos\left(\varphi+\theta\right)\right)\right). \qquad (10)$$

Упростим выражение, учитывая то, что

$$\sin(\varphi+\varphi_0-\theta)+\sin(\varphi+\varphi_0+\theta)=$$
$$=2\sin\frac{\varphi+\varphi_0-\theta+\varphi+\varphi_0+\theta}{2}\times$$
$$\times\cos\frac{\varphi+\varphi_0-\theta-\varphi-\varphi_0-\theta}{2}=2\sin(\varphi+\varphi_0)\times$$
$$\times\cos(-\theta)=2\sin(\varphi+\varphi_0)\cos\theta;$$
$$-2\sin(\varphi+\varphi_0)+2\sin\varphi=-2\big(\sin(\varphi+\varphi_0)-$$
$$-\sin\varphi\big)=-4\sin\frac{\varphi+\varphi_0-\varphi}{2}\cos\frac{\varphi+\varphi_0+\varphi}{2}=$$
$$=-4\cos\left(\varphi+\frac{\varphi_0}{2}\right)\sin\frac{\varphi_0}{2};$$

Следовательно:

$$e\dot\beta\big(\sin(\varphi+\varphi_0-\theta)-2\sin(\varphi+\varphi_0)+$$
$$+\sin(\varphi+\varphi_0+\theta)-\sin(\varphi+\theta)+2\sin\varphi-$$
$$-\sin(\varphi+\theta)\big)=e\dot\beta\big(2\sin(\varphi+\varphi_0)\cos\theta-$$
$$-4\cos\left(\varphi+\frac{\varphi_0}{2}\right)\sin\frac{\varphi_0}{2}-2\sin(\varphi+\theta)\big)=$$
$$=2e\dot\beta\left(\sin(\varphi+\varphi_0)\cos\theta-2\cos\left(\varphi+\frac{\varphi_0}{2}\right)\times\right.$$
$$\left.\times\sin\frac{\varphi_0}{2}-\sin(\varphi+\theta)\right);$$
$$\cos(\varphi+\varphi_0-\theta)+\cos(\varphi+\varphi_0+\theta)=$$
$$=2\cos\frac{\varphi+\varphi_0-\theta+\varphi+\varphi_0+\theta}{2}\times$$
$$\times\cos\frac{\varphi+\varphi_0-\theta-\varphi-\varphi_0-\theta}{2}=2\cos(\varphi+\varphi_0)\times$$
$$\times\cos(-\theta)=2\cos(\varphi+\varphi_0)\cos\theta;$$
$$-2\cos(\varphi+\varphi_0)-2\cos\varphi=-2\big(\cos\varphi+$$
$$+\cos(\varphi+\varphi_0)\big)=-2\left(2\cos\frac{\varphi+\varphi_0+\varphi}{2}\times\right.$$
$$\left.\times\cos\frac{\varphi-\varphi_0-\varphi}{2}\right)=-4\cos\left(\varphi+\frac{\varphi_0}{2}\right)\cos\left(-\frac{\varphi_0}{2}\right)=$$
$$=-4\cos\left(\varphi+\frac{\varphi_0}{2}\right)\cos\frac{\varphi_0}{2};$$

Следовательно:

$$-e\dot\alpha\big(\cos(\varphi+\varphi_0-\theta)-2\cos(\varphi+\varphi_0)+$$
$$+\cos(\varphi+\varphi_0+\theta)+\cos(\varphi+\theta)-2\cos\varphi+$$
$$+\cos(\varphi+\theta)\big)=-e\dot\alpha\big(2\cos(\varphi+\varphi_0)\cos\theta-$$
$$-4\cos\left(\varphi+\frac{\varphi_0}{2}\right)\cos\frac{\varphi_0}{2}+2\cos(\varphi+\theta)\big)=-2e\dot\alpha\times$$
$$\times\left(\cos(\varphi+\varphi_0)\cos\theta-2\cos\left(\varphi+\frac{\varphi_0}{2}\right)\cos\frac{\varphi_0}{2}+\right.$$
$$\left.+\cos(\varphi+\theta)\right).$$

После проведенных преобразований уравнение (10) принимает вид:

$$\overline{\Phi}_c=-m\dot\varphi\overline{i}\left(2e\dot\beta\left(\sin(\varphi+\varphi_0)\cos\theta-\right.\right.$$
$$\left.-2\cos\left(\varphi+\frac{\varphi_0}{2}\right)\sin\frac{\varphi_0}{2}-\sin(\varphi+\theta)\right)-2e\dot\alpha\times$$
$$\times\left(\cos(\varphi+\varphi_0)\cos\theta-2\cos\left(\varphi+\frac{\varphi_0}{2}\right)\cos\frac{\varphi_0}{2}+\right.$$
$$\left.\left.+\cos(\varphi+\theta)\right)\right)=-2me\dot\varphi\overline{i}\left(\dot\beta\left(\sin(\varphi+\varphi_0)\cos\theta-\right.\right.$$
$$\left.-2\cos\left(\varphi+\frac{\varphi_0}{2}\right)\sin\frac{\varphi_0}{2}-\sin(\varphi+\theta)\right)-$$
$$-\dot\alpha\left(\cos(\varphi+\varphi_0)\cos\theta-2\cos\left(\varphi+\frac{\varphi_0}{2}\right)\cos\frac{\varphi_0}{2}+\right.$$
$$\left.\left.+\cos(\varphi+\theta)\right)\right).\tag{11}$$

Множитель $\overline{i}$ бесспорно свидетельствует о том, что кориолисовая сила инерции направлена вдоль оси x, параллельно осям дебалансных валов. Модуль ее можно определить по такой зависимости:

$$\Phi_c=-2me\dot\varphi\left(\dot\beta\left(\sin(\varphi+\varphi_0)\cos\theta-\right.\right.$$
$$\left.-2\cos\left(\varphi+\frac{\varphi_0}{2}\right)\sin\frac{\varphi_0}{2}-\sin(\varphi+\theta)\right)-$$
$$-\dot\alpha\left(\cos(\varphi+\varphi_0)\cos\theta-2\cos\left(\varphi+\frac{\varphi_0}{2}\right)\cos\frac{\varphi_0}{2}+\right.$$
$$\left.\left.+\cos(\varphi+\theta)\right)\right).\tag{12}$$

Определим главный вектор сил инерции $\overline{F}_o$:

$$\overline{F}_O=F_x\overline{i}+F_y\overline{j}+F_z\overline{k}\ .$$

Проекции главного вектора на оси координат определяются по следующим формулам:

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

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

$$\sum F_{iy} = \frac{\Phi_1}{2}\sin(\varphi_0+\varphi-\theta) - \Phi_1\sin(\varphi_0+\varphi) +$$

$$+\Phi_1\sin\varphi + \frac{\Phi_1}{2}\sin(\varphi+\varphi_0+\theta) - \frac{\Phi_1}{2}\times$$

$$\times\sin(\varphi+\theta) - \frac{\Phi_1}{2}\sin(\varphi+\theta) =$$

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

$$\sum F_{iz} = -\frac{\Phi_1}{2}\cos(\varphi+\varphi_0-\theta) + \Phi_1\cos(\varphi_0+\varphi) +$$

$$+\Phi_1\cos\varphi - \frac{\Phi_1}{2}\cos(\varphi+\varphi_0+\theta) - \frac{\Phi_1}{2}\cos(\varphi+\theta) -$$

$$-\frac{\Phi_1}{2}\cos(\varphi+\theta) =$$

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

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

$$F_O = 2\Phi_1\sin\frac{\theta}{2}\left(cos^2\frac{\theta}{2} + \right.$$

$$\left. +4\sin\frac{\theta}{2}\cos\left(\varphi+\frac{\varphi_0}{2}\right)\sin\left(\varphi+\frac{\varphi_0}{2}+\frac{\theta}{2}\right)\right)^{1/2}. \qquad (13)$$

Учитывая то, что $\Phi_1 = me\dot{\varphi}^2$, уравнение (13) перепишем в другом виде:

$$F_O = 2me\dot{\varphi}^2\sin\frac{\theta}{2}\left(cos^2\frac{\theta}{2} + \right.$$

$$\left. +4\sin\frac{\theta}{2}\cos\left(\varphi+\frac{\varphi_0}{2}\right)\sin\left(\varphi+\frac{\varphi_0}{2}+\frac{\theta}{2}\right)\right)^{1/2}. \qquad (14)$$

Выводы

Учитывая то, что частоты $\dot{\alpha}$ и $\dot{\beta}$ изменения углов α и β имеют тот же порядок, что и частота вращения дебалансного вала $\dot{\varphi}$, величина кориолисовой силы инерции дебалансов имеет одинаковый порядок с величиной центробежной силы. Ее необходимо учитывать при конструировании блока вибровозбудителей винтовых колебаний а также при математическом моделировании машин с такими вибровозбудителями.

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.
8. Черевко А.Н. Влияние сдвига фаз управляемых дебалансных вибровозбудителей на структуру силового поля / А.Н. Черевко, П.А. Черевко Вибрації в техніці та технологіях. – 2011. – №1(61). – С.59-71.
9. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики / Н.Н. Никитин. – Москва. ”Высшая школа”, 1990. – 607 с.