

УДК 621.928:664(06)

Влияние начальной фазировки дебалансов в центробежном вибровозбудителе на характеристики закона колебаний силового фактора

Канд. техн. наук **А.М. Васильев**, tmmrkm49@gmail.com
 докт. техн. наук **С.А. Бредихин**, bredihin2006@yandex.ru
 канд. техн. наук **В.К. Андреев**, andreev_v_k@mail.ru

*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева;
 127550, Россия, Москва, ул. Тимирязевская, 49*

В статье доказано, что четырехдебалансный вибровозбудитель в зависимости от взаимного начального расположения дебалансов может сообщать рабочим органам машин колебания, подчиняющиеся либо несимметричному, либо симметричному негармоническому закону. Несимметричность закона колебаний заключается в неравенстве наибольшего положительного значения ускорения наибольшему по абсолютной величине отрицательному значению ускорения рабочего органа, симметричность закона – в равенстве этих наибольших значений ускорения. Установлено, что если в начальном положении медленно- и быстро вращающихся дебалансов их силы инерции создают максимальные силовые факторы, то вибровозбудитель возбуждает колебания по несимметричному закону. Если в начальном положении силы инерции этих дебалансов создают силовые факторы равные нулю, то вибровозбудитель возбуждает колебания по симметричному закону. Этот эффект может быть использован при создании унифицированного привода вибрационных транспортных и технологических машин.

Ключевые слова: вибротехника; негармонические колебания; силовой фактор; сила инерции; центробежный вибровозбудитель.

DOI: 10.17586/2310-1164-2019-12-1-27-35

The influence of the initial phasing of the unbalances in the centrifugal vibration exciter on the characteristics of the power factor oscillations law

Ph. D. **Alexander M. Vasiliev**, tmmrkm49@gmail.com
 D. Sc. **Sergey A. Bredikhin**, bredihin2006@yandex.ru
 Ph. D. **Vladimir K. Andreev**, andreev_v_k@mail.ru

*Russian State Agrarian University – K.A. Timiryazev
 49, Timiryazevskaya str., Moscow, 127550, Russia*

The article proves that a four-unbalance vibration exciter, depending on the mutual initial arrangement of the unbalances, is able to excite oscillations to the working bodies of machines which obey either asymmetric or symmetric non-harmonic law. The asymmetry of the law of oscillations lies in the inequality of the greatest positive value of acceleration, the largest absolute value of the negative value of the acceleration of the working body, the symmetry of the law – in the equality of these highest values of acceleration. It has been established that if in the initial position of slowly and rapidly rotating unbalances their inertia forces create maximum force factors, than the vibration exciter excites oscillations according to asymmetric law. If, in the initial position, the inertial forces of these unbalances create force factors equal to zero, then the vibration exciter excites according to symmetrical law. This effect can be used to create a unified drive for vibratory transport and technological machines.

Keywords: vibrotechnique; non-harmonic oscillations; force factor; inertial force; centrifugal vibration exciter.

Введение

Центробежные вибровозбудители нашли широкое применение в транспортном и технологическом вибрационном оборудовании [1–3] при переработке сыпучих материалов, например, в мукомольной отрасли пищевой промышленности. Известно [4–6], что центробежный вибровозбудитель, содержащий четыре дебаланса, вращающихся вокруг параллельных осей, имеющих попарно одинаковые по величине угловые скорости и дисбалансы способен сообщить рабочему органу машины негармонические (несимметричные) колебания. Такие колебания могут быть обеспечены при условии, что угловая скорость одной пары дебалансов отличается вдвое от угловой скорости второй пары дебалансов и в начальном положении (рисунок 1а) силы инерции медленно- и быстро вращающихся дебалансов создают максимальные по величине силовые факторы (силы) одинакового направления,

принятого за положительное. В этом случае вибровозбудитель возбуждает колебания силового фактора по закону, который в безразмерном выражении может быть представлен в виде

$$f(\delta) = a \cos 2\delta + \cos \delta, \tag{1}$$

где δ – угол поворота медленновращающихся дебалансов из начального положения;

a – коэффициент, зависящий от соотношения максимальных значений силовых факторов, создаваемых силами инерции медленно- и быстро вращающихся дебалансов.

Несимметрия закона колебаний означает неравенство наибольшего положительного значения силового фактора и наибольшего по абсолютной величине его отрицательного значения.

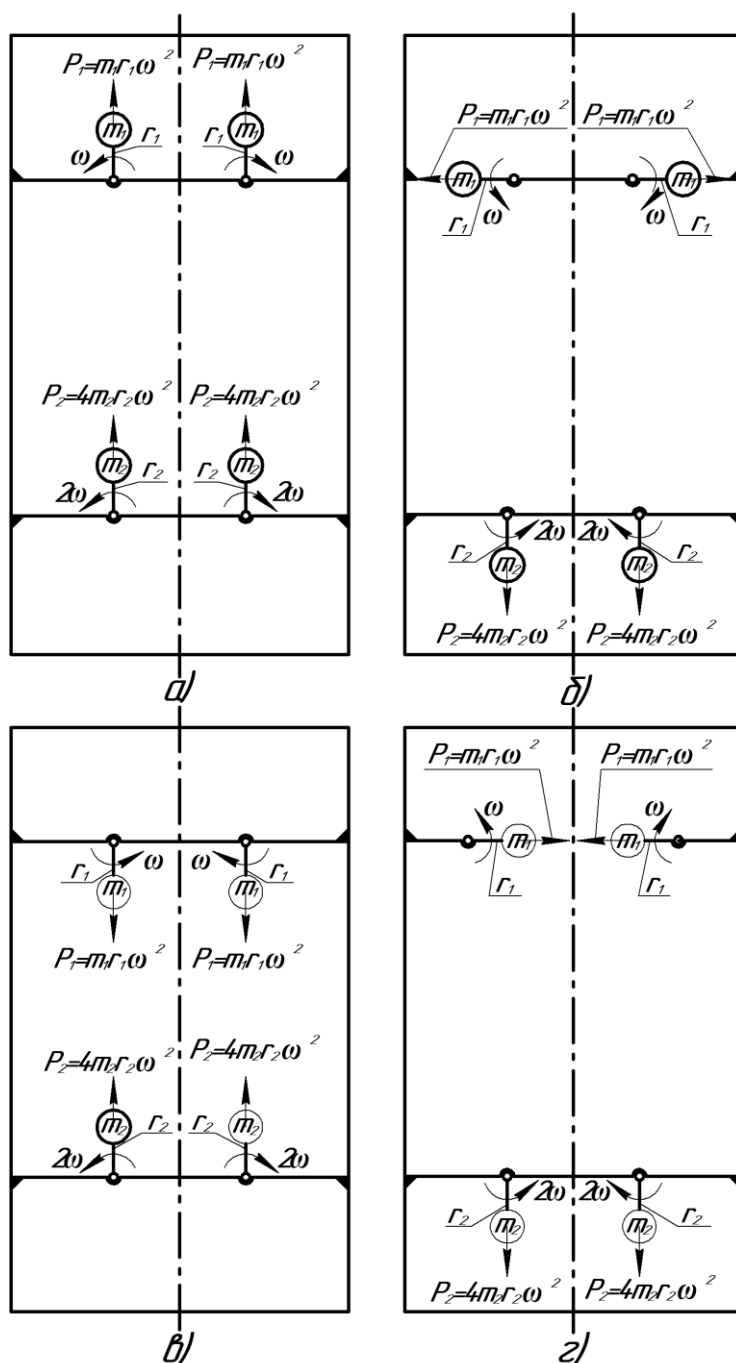


Рисунок 1 – Схема вибровозбудителя для возбуждения колебаний силы при значениях δ :

Figure 1. Vibration exciter exciting oscillations at different values of δ :

a) $\delta = 0^\circ$; б) $\delta = 90^\circ$; в) $\delta = 180^\circ$; з) $\delta = 270^\circ$

Исследования [5, 7, 9] зависимости силового фактора на экстремумы при различных значениях коэффициента a в уравнении (1) позволили сделать следующие выводы. Наибольшее различие максимальные значения силового фактора в противоположных направлениях имеют при отношении максимального значения силового фактора, создаваемого силами инерции медленно-вращающихся дебалансов, к максимальному значению силового фактора, создаваемого силами инерции быстро-вращающихся дебалансов, равном двум, то есть при отношении, равном передаточному отношению передачи, синхронизирующей и согласовывающей по фазе вращение дебалансов в вибровозбудителе. Наибольшее по абсолютной величине значение силового фактора соответствует начальному положению дебалансов. Последнее положение можно подтвердить, рассматривая ряд последовательных положений дебалансов при условии: медленно-вращающиеся дебалансы поворачиваются из начального положения на угол, шаг варьирования которого равен 90° (рисунок 1б, в, г). При рассмотрении каждого положения дебалансов оцениваем величину и направление силового фактора, создаваемого силами инерции каждой пары дебалансов и вибровозбудителя в целом. Как видно из рисунка (рисунок 1а, б, в, г), в течение кинематического цикла механизма вибровозбудителя медленно- и быстро-вращающиеся дебалансы занимают одно положение, в котором их силы инерции создают одновременно максимальные силовые факторы в одном направлении. Это направление совпадает с начальным положением дебалансов. Следовательно, возбуждаемый вибровозбудителем силовой фактор принимает наибольшие значения в начале и в конце кинематического цикла механизма вибровозбудителя.

Несмотря на широкое использование центробежного вибровозбудителя в вибрационном транспортном и технологическом оборудовании, недостаточно полно используются возможности этого способа сообщения колебаний рабочим органам машин. В современной научно-технической литературе отсутствуют публикации по такому важному направлению, как влияние установочных параметров вибровозбудителя на характер закона колебаний, сообщаемых вибровозбудителем рабочим органам машин. Настоящая работа посвящена исследованию влияния установочных параметров (соотношение дисбалансов медленно- и быстро-вращающихся дебалансов и начальной фазировки дебалансов) вибровозбудителя на характер закона колебаний силового фактора, возбуждаемого вибровозбудителем. Актуальность настоящего исследования заключается в обосновании создания унифицированного вибропривода, который может быть использован как в транспортном, так и в технологическом оборудовании. Унифицированность привода заключается в том, что при его различной наладке, он способен сообщить рабочему органу машины колебания по закону, соответствующему осуществляемому в оборудовании процессу.

Методы. Исследование характеристик закона колебаний силового фактора

Для дальнейших рассуждений особый интерес представляет следующее доказательство этого положения.

Из уравнения (1) видно, что силовой фактор принимает наибольшее значение в положительном направлении, если имеет решение система уравнений

$$\begin{cases} \cos \delta = 1 \\ \cos 2\delta = 1 \end{cases} \quad (2)$$

Первое уравнение системы уравнений (2) имеет решение при следующих значениях угла δ поворота медленно-вращающихся дебалансов: $\delta = 0^\circ$ и $\delta = 360^\circ$.

Поскольку в течение кинематического цикла механизма вибровозбудителя быстро-вращающиеся дебалансы делают два оборота, то второе уравнение системы (2) имеет решение при следующих значениях угла поворота быстро-вращающихся дебалансов: $2\delta = 0^\circ$; $2\delta = 360^\circ$ и $2\delta = 720^\circ$. В этой связи второе уравнение системы (2) имеет решение при следующих значениях угла поворота медленно-вращающихся дебалансов: $\delta = 0^\circ$; $\delta = 180^\circ$ и $\delta = 360^\circ$. Следовательно, система уравнений (2) имеет решение при следующих значениях угла δ : $\delta = 0^\circ$ и $\delta = 360^\circ$. Как видно из решения, возбуждаемый вибровозбудителем силовой фактор принимает наибольшее положительное значение в начальном положении дебалансов, то есть в начале и конце кинематического цикла механизма вибровозбудителя.

Силовой фактор может иметь наибольшее по абсолютной величине значение в отрицательном направлении, если имеет решение система уравнений

$$\begin{cases} \cos \delta = -1 \\ \cos 2\delta = -1 \end{cases} \quad (3)$$

Первое уравнение системы (3) имеет решение при значении угла δ поворота медленновращающихся дебалансов равно $\delta = 180^\circ$.

Второе уравнение системы (3) имеет решение при следующих значениях угла 2δ поворота быстро вращающихся дебалансов: $2\delta = 180^\circ$ и $2\delta = 540^\circ$. При этом медленно вращающиеся дебалансы поворачиваются на углы: $\delta = 90^\circ$ и $\delta = 270^\circ$. Следовательно, система уравнений (3) решения не имеет.

Наличие решения системы уравнений (2) и отсутствие решения системы уравнений (3) является доказательством того, что такой вибровозбудитель возбуждает колебания силового фактора по несимметричному закону. Наибольшее значение силового фактора имеет в положительном направлении.

Следует заметить, что из рассмотрения последовательных положений дебалансов, которые они могут занимать в течение кинематического цикла механизма вибровозбудителя, можно сделать следующий вывод. В таком вибровозбудителе в течение кинематического цикла медленно и быстро вращающиеся дебалансы не занимают одновременно положения, в которых их силы инерции создают силовые факторы, равные нулю.

Для подтверждения этого вывода рассмотрим, имеет ли решение система уравнений

$$\begin{cases} \cos \delta = 0 \\ \cos 2\delta = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Первое уравнение системы (4) имеет решение при следующих значениях угла поворота медленно вращающихся дебалансов: $\delta = 90^\circ$ и $\delta = 270^\circ$.

Второе уравнение системы (4) имеет решение при повороте быстро вращающихся дебалансов на углы: $2\delta = 90^\circ$; $2\delta = 270^\circ$; $2\delta = 450^\circ$ и $2\delta = 360^\circ$. При этом углы поворота медленно вращающихся дебалансов принимают следующие значения: $\delta = 45^\circ$; $\delta = 135^\circ$; $\delta = 225^\circ$ и $\delta = 315^\circ$. Следовательно, система уравнений (4) решения не имеет. Это является подтверждением того, что в таком вибровозбудителе (при таком начальном положении дебалансов и отношении угловой скорости быстро вращающихся дебалансов к угловой скорости медленно вращающихся дебалансов, равно $\omega_2 \cdot (\omega_1)^{-1} = 2$ дебалансы никогда не займут положение, в котором, создаваемые силами инерции медленно и быстро вращающихся дебалансов силовые факторы одновременно равны нулю.

Определим зависимость силового фактора, возбуждаемого вибровозбудителем при условии: в начальном положении дебалансов создаваемые силами инерции медленно и быстро вращающихся дебалансов силовые факторы равны нулю. Интерес к такому начальному положению дебалансов вызван тем, что это их положение легко реализуется на практике при монтаже и наладке вибровозбудителя.

На рисунке 2а представлена схема вибровозбудителя, предназначенного для возбуждения колебаний силы при таком начальном положении дебалансов.

Следует заметить, что такое начальное положение дебалансов является универсальным. Так, при вращении дебалансов, имеющих одинаковые по величине угловые скорости, в противоположных направлениях вибровозбудитель возбуждает колебания силы. В том случае, если дебалансы вращаются в одном направлении, то вибровозбудитель возбуждает колебания момента.

Для определения зависимости возбуждаемого вибровозбудителем силового фактора (силы) рассмотрим некоторое произвольное положение дебалансов, которое соответствует повороту из начального положения медленно вращающихся (первой пары) дебалансов на угол δ и быстро вращающихся (второй пары) дебалансов на угол 2δ (рисунок 2б). Разложим центробежную силу инерции каждого дебаланса на две составляющие: вертикальную и горизонтальную. Как видно из рисунка 2б, горизонтальные составляющие сил инерции одноименных дебалансов уравновешивают друг друга. Вертикальные составляющие сил инерции медленно вращающихся дебалансов складываясь образуют результирующую силу, равную $P_{p1} = 2m_1 r_1 \omega^2 \sin \delta$. Вертикальные

составляющие сил инерции быстро вращающихся дебалансов складываясь образуют результирующую силу, равную $P_{p2} = 8m_2r_2\omega^2 \sin 2\delta$. Алгебраическая сумма результирующих сил P_{p1} и P_{p2} , равная $P_{\Sigma} = 2m_1r_1\omega^2 \sin \delta + 8m_2r_2\omega^2 \sin 2\delta$, является равнодействующей центробежных сил инерции дебалансов вибровозбудителя. Следовательно, вибровозбудитель при таком начальном положении дебалансов возбуждает прямолинейно колеблющуюся силу, зависимость которой в безразмерном выражении может быть представлена в общем случае в виде

$$f(\delta) = a \sin 2\delta + \sin \delta. \tag{5}$$

Легко убедиться, что аналогичный вид имеет зависимость момента, возбуждаемого четырехдебалансным вибровозбудителем при таком же начальном положении дебалансов.

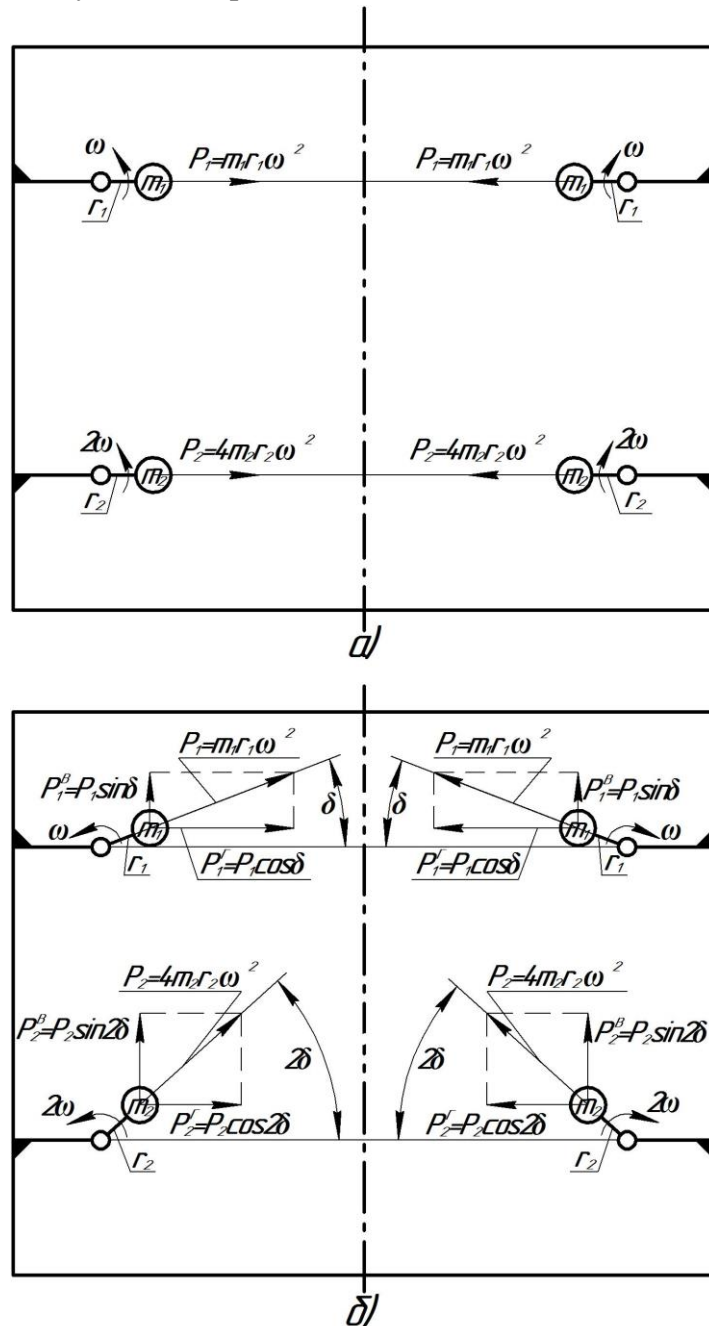


Рисунок 2 – Схема вибровозбудителя для возбуждения колебаний силы:
 а) начальное положение дебалансов; б) произвольное положение дебалансов

Figure 2. Vibration exciter exciting oscillations:
 а) initial position of unbalances; б) random position of unbalances

Из уравнения (5) следует: максимальное значение силового фактора, создаваемого силами инерции быстровращающихся дебалансов, в безразмерном выражении равно $f_{2\max} = a$; максимальное значение силового фактора, создаваемого силами инерции медленновращающихся дебалансов в безразмерном выражении равно единице ($f_{1\max} = 1$). Заметим, что величина коэффициента a в уравнении (5) является величиной положительной $a > 0$. При этом $f_{1\max} \cdot (f_{2\max})^{-1} = a^{-1}$. Исследования зависимости (5) на экстремумы при различных значениях коэффициента a , то есть при различных соотношениях максимальных силовых факторов, создаваемых силами инерции медленно- и быстровращающихся дебалансов, позволили сделать следующий вывод. Зависимость силового фактора, возбуждаемого вибровозбудителем, симметрична при условии, что в начальном положении дебалансов силы инерции медленно- и быстровращающихся дебалансов создают силовые факторы, равные нулю.

На рисунке 3 представлены графики зависимостей силового фактора от угла поворота дебалансов за кинематический цикл механизма вибровозбудителя для случаев $f_{1\max} \cdot (f_{2\max})^{-1} = 1$ (рисунок 3а) и $f_{1\max} \cdot (f_{2\max})^{-1} = 2$ (рисунок 3б). Из рисунков видно, что зависимости симметричны. При $f_{1\max} \cdot (f_{2\max})^{-1} = 1$ силовой фактор в течение кинематического цикла механизма вибровозбудителя имеет два положительных экстремума и два отрицательных, попарно равных друг другу по абсолютной величине. При $f_{1\max} \cdot (f_{2\max})^{-1} = 2$ силовой фактор имеет один положительный и один отрицательный экстремумы, равные друг другу по абсолютной величине. На интервалах значений угла δ между экстремумами силовой фактор принимает значения, равные нулю.

На следующем этапе исследования было определено условие существования в течение кинематического цикла механизма вибровозбудителя двух или четырех экстремумов силового фактора.

Для определенности дальнейших рассуждений будем считать, что зависимость силового фактора в общем случае описывается уравнением (5).

Определим значения угла δ , при которых силовой фактор становится равным нулю. Для этого приравняем нулю правую часть уравнения (5). После преобразований получим

$$\sin \delta \cdot (2a \cos \delta + 1) = 0. \quad (6)$$

Решая уравнение (6) приходим к следующему заключению. При $a \leq 0,5$, что соответствует условию $f_{1\max} \cdot (f_{2\max})^{-1} = a^{-1} \geq 2$, силовой фактор становится равным нулю при следующих значениях угла δ : $\delta = 0^\circ$; $\delta = 180^\circ$ и $\delta = 360^\circ$. При этом силовой фактор имеет два экстремума, один положительный и один отрицательный, абсолютные величины которых равны. При $a > 0,5$, что соответствует условию $f_{1\max} \cdot (f_{2\max})^{-1} < 2$, силовой фактор принимает значение, равное нулю, при следующих значениях угла δ : $\delta = 0^\circ$; $\delta = \arccos\{-(2a)^{-1}\}$; $\delta = 180^\circ$; $\delta = 360^\circ - \arccos\{-(2a)^{-1}\}$ и $\delta = 360^\circ$.

Отметим, что $90^\circ < \arccos\{-(2a)^{-1}\} < 180^\circ$ и $180^\circ < 360^\circ - \arccos\{-(2a)^{-1}\} < 270^\circ$. То есть в этом случае силовой фактор имеет значение равное нулю в начале, середине, конце кинематического цикла, а также на интервалах между началом и серединой, серединой и окончанием кинематического цикла. В этом случае в течение кинематического цикла механизма вибровозбудителя силовой фактор имеет четыре экстремума, два положительных и два отрицательных, попарно равных друг другу по абсолютной величине. В течение кинематического цикла механизма вибровозбудителя положительные экстремумы чередуются с отрицательными. При этом с увеличением коэффициента a , то есть с увеличением дисбаланса быстровращающегося дебаланса, все четыре экстремума увеличиваются по абсолютной величине.

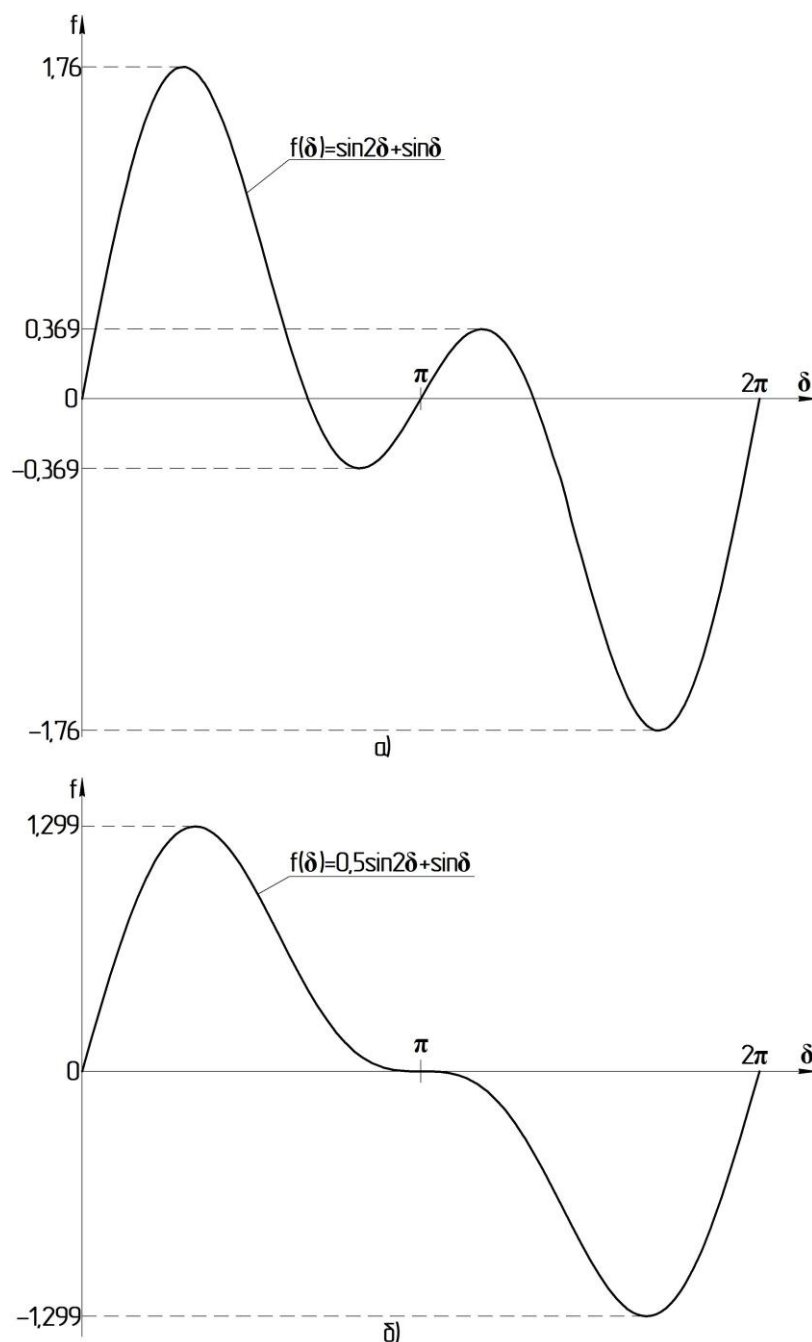


Рисунок 3 – Зависимость силового фактора в безразмерном выражении от угла поворота дебалансов за кинематический цикл механизма вибровозбудителя:

Figure 3. The dependence of non-dimensional inertia force on the turning angle of unbalances in one cinematic cycle of vibration exciter:

$$a) f_{1\max} \cdot (f_{2\max})^{-1} = 1; \text{ б) } f_{1\max} \cdot (f_{2\max})^{-1} = 2$$

Результаты и их обсуждение

Результаты представленных исследований позволяют сделать следующий вывод. Центробежный вибровозбудитель, содержащий четыре дебаланса, имеющих попарно одинаковые по величине угловые скорости и дисбалансы, вращающихся вокруг параллельных осей с угловыми скоростями, отличающимися вдвое, в зависимости от начальной фазировки дебалансов может сообщать рабочему органу машины колебания с ускорением либо по несимметричному, либо по симметричному закону. Величина средней скорости транспортирования частиц сыпучего тела относительно колеблющейся поверхности при прочих одинаковых условиях (частота колебаний, коэффициент трения частиц о поверхность) зависит от того, насколько наибольшее положительное значение ускорения поверхности отличается от наибольшего по абсолютной величине отрицательного ее ускорения [10–12].

Средняя скорость виброперемещения является основным параметром, определяющим в транспортном оборудовании производительность, в сепарирующем (технологическом) оборудовании – производительность и эффективность осуществляемого в этом оборудовании процесса [13–15]. Средняя скорость виброперемещения влияет на эффективность процесса сепарирования [2, 3] поскольку определяет толщину слоя сыпучего материала и время его пребывания на рабочем органе. Уменьшение толщины слоя сыпучего тела до определенного предела повышает эффективность процесса сепарирования. Уменьшение времени процесса сепарирования снижает его эффективность. Следовательно, в транспортном оборудовании, для увеличения его производительности, транспортирующему рабочему органу необходимо сообщать несимметричный закон колебаний с наибольшим различием по абсолютной величине положительного и отрицательного значений ускорения. В сепарирующих машинах параметры закона колебаний рабочего органа должны соответствовать виду осуществляемого в машине процесса. В случае необходимости закон колебаний рабочего органа должен обеспечить эффективное самосортирование сыпучего материала. Эффективность самосортирования находится в прямой зависимости от продолжительности и интенсивности воздействия вибраций на сыпучее тело. Следовательно, предлагаемый способ регулирования параметров колебаний рабочей поверхности с применением центробежного вибровозбудителя, содержащего четыре дебаланса, открывает перспективу создания унифицированного (многофункционального) привода транспортного и технологического оборудования зерноперерабатывающих предприятий, а также предприятий других отраслей промышленности, связанных с переработкой сыпучих материалов.

Литература

1. *Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю.* Вибрационное перемещение. М.: Наука, 1964. 412 с.
2. *Борискин М.А., Гортинский В.В., Демский А.Б.* Сепарирующие машины зерноперерабатывающих предприятий. М.: Машиностроение, 1979. 109 с.
3. *Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А.* Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1980. 304 с.
4. *Вибрации в технике: справочник. В 6 т. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / ред. Э.Э. Лавендела.* М.: Машиностроение, 1981. 509 с.
5. *Вайсберг Л.А.* Проектирование и расчет вибрационных грохотов. М.: Недра, 1986. 144 с.
6. *Фролов К.В.* (гл. ред.) Машиностроение: энциклопедия. Т. IV-17. Машины и оборудование в пищевой и перерабатывающей промышленности / ред. С.А. Мачихин. М.: Машиностроение, 2003. 736 с.
7. *Кудряков Р.А.* Вибродвижитель: пат. 2348467 Российская Федерация. 2007. Бюл. 7. 11 с.
8. *Васильев А.М., Васильев С.М., Мачихин С.А., Абрамов Э.В., Волков А.С., Киракосян Д.В.* Способ возбуждения механических колебаний силовых факторов с прогнозируемыми параметрами: пат. 2528550 Российская Федерация. 2012. Бюл. 26. 29 с.
9. *Васильев А.М., Васильев С.М., Мачихин С.А., Абрамов Э.В., Волков А.С., Киракосян Д.В.* Способ возбуждения негармонических колебаний момента в вибрационных сепарирующих машинах: пат. 2528271 Российская Федерация. 2012. Бюл. 25. 12 с.
10. *Васильев А.М., Мачихин С.А., Стрелюхина А.Н.* К вопросу о возбуждении негармонических колебаний силы и момента центробежным вибровозбудителем // *Хранение и переработка сельхозсырья.* 2015. № 10. С. 12–17.
11. *Васильев А.М., Мачихин С.А., Стрелюхина А.Н.* Влияние силовых факторов дебалансов центробежного вибровозбудителя на параметры колебаний // *Хранение и переработка сельхозсырья.* 2015. № 11. С. 49–54.
12. *Сафонов Б.Ф.* Инерционный движитель: пат. 2097600 Российская Федерация. 1997. 7 с.
13. *Кристалль М.Г., Смирнов И.А., Безрукова Т.В., Макиевский А.В.* Вибролоток: пат. 2201885 Российская Федерация. 2003. 7 с.
14. *Еременко В.И., Еременко С.В.* Импульсно-инерционный движитель (ИИД) и агрегатированный импульсно-инерционный движитель (АИИД) для транспортного средства: пат. 2455187. 2012. Бюл. 19. 18 с.
15. *Бредихин С.А., Бредихин А.С., Жуков В.Г., Космодемьянский Ю.В., Якушев А.О.* Процессы и аппараты пищевой технологии: учебное пособие. СПб.: Лань, 2014. 544 с.

References

1. *Blekhman I.I., Dzhanelidze G.Yu.* *Vibratsionnoe peremeshchenie* [Vibrational movement]. Moscow. Science Publ., 1964. 412 p.
2. *Boriskin M.A., Gortinskii V.V., Demskii A.B.* *Separiruyushchie mashiny zernopererabatyvayushchikh predpriyatii* [Separating machines of grain processing enterprises]. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1979. 109 p.

3. Gortinsky V.V. Gortinskii V.V., Demskii A.B., Boriskin M.A. *Protsessy separirovaniya na zernopererabatyvayushchikh predpriyatiyakh* [Separation processes at grain processing enterprises]. Moscow. Kolos Publ., 1980. 304 p.
4. Vibratsii v tekhnike [Vibrations in technology]. Handbook. 6 V. In red. Lavendela E.E. *Vibratsionnye protsessy i mashiny* [Vibration processes and machines], V. 4. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1981. 509 p.
5. Vaisberg L.A. *Proektirovanie i raschet vibratsionnykh grokhotov* [Design and calculation of vibrating screens]. Moscow. Nedra Publ., 1986. 144 p.
6. Frolov K.V. (Chief ed.) *Mashinostroenie* [Mechanical Engineering]. Encyclopedia: TIV-17. In ed. Machikhin S.A. *Mashiny i oborudovanie v pishchevoi i pererabatyvayushchei promyshlennosti* [Machines and equipment for the food and processing industry]. Moscow. Mashinostroenie Publ., 2003. 736 p.
7. Kudryakov R.A. *Vibrodvizhitel'* [Vibrating propulsion]. Patent RF, no. 2348467. 2007.
8. Vasil'ev A.M., Vasil'ev S.M., Machikhin S.A., Abramov E.V., Volkov A.S., Kirakosyan D.V. *Sposob возбуждения механических колебаний силовых факторов с прогнозируемыми параметрами* [Method of excitation of mechanical oscillations of power factors with predictable parameters]. Patent RF, no. 2528550. 2012.
9. Vasil'ev A.M., Vasil'ev S.M., Machikhin S.A., Abramov E.V., Volkov A.S., Kirakosyan D.V. *Sposob возбуждения негармонических колебаний момента в вибрационных separating machines* [The way of excitation of non-harmonic oscillations of the moment in vibration separating machines]. Patent RF, no. 2528271. 2012.
10. Vasil'ev A.M., Machikhin S.A., Strelyukhina A.N. K voprosu o возбуждении негармонических колебаний силы и момента центробежным вибровозбудителем [On the question of the excitation of non-harmonic oscillations of force and moment by a centrifugal vibration exciter]. *Storage and processing of farm products*. 2015, no. 10, pp. 12–17.
11. Vasil'ev A.M., Machikhin S.A., Strelyukhina A.N. Vliyaniye silovykh faktorov debalansov tsentrobezhnogo vibrovozбудителя na parametry kolebaniy [The influence of the power factors of the unbalance of the centrifugal vibration exciter on the oscillation parameters]. *Storage and processing of farm products*. 2015, no. 11, pp. 49–54.
12. Safonov B.F. *Inertsionnyi dvizhitel'* [Inertial propulsion]. Patent RF, no. 2097600. 1997.
13. Kristal' M.G., Smirnov I.A., Bezrukova T.V., Makievskii A.V. *Vibrolotok*. Patent RF, no. 2201885. 2003.
14. Eremenko V.I., Eremenko S.V. *Impul'sno-inertsionnyi dvizhitel' (IID) i agregatirovannyi impul'sno-inertsionnyi dvizhitel' (AIID) dlya transportnogo sredstva* [Pulse inertial propulsion (ID) and aggregated pulsed inertial propulsion (AID) for a vehicle]. Patent RF, no. 2455187. 2012.
15. Bredikhin S.A., Bredikhin A.S., Zhukov V.G., Kosmodem'yanskii Yu.V., Yakushev A.O. *Protsessy i apparaty pishchevoi tekhnologii* [Processes and devices of food technology]. St. Petersburg, Lan Publ., 2014. 544 p.

Статья поступила в редакцию 14.02.2019