

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАКОНА КОЛЕБАНИЙ СИЛЫ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ВОЗБУДИТЕЛЕМ ВИБРАЦИОННЫХ МАШИН

ВАСИЛЬЕВ Александр Михайлович, РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева

БРЕДИХИН Сергей Алексеевич, РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева

АНДРЕЕВ Владимир Константинович, РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева

РУДИК Феликс Яковлевич, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

Статья посвящена исследованию параметров закона колебаний силы, возбуждаемой центробежным вибровозбудителем вибрационных машин.

Введение. В вибрационных технологических и транспортных машинах зерновой отрасли промышленности для сообщения колебаний рабочим органам машин применяют центробежные вибровозбудители [1, 7, 8, 12]. Известно [4, 5, 9], что одной из причин возникновения односторонне направленного движения материальной частицы относительно горизонтальной однородно шероховатой плоскости, совершающей горизонтальные колебания, является несимметрия закона колебаний плоскости. Несимметрия закона колебаний означает неравенство абсолютных величин максимальных значений ускорения плоскости в противоположных направлениях.

Для сообщения таких колебаний плоскости применяют центробежный вибровозбудитель [2, 6, 8], содержащий четыре дебаланса, вращающихся вокруг параллельных осей, расположенных на общем основании, которые вращаются равномерно и попарно имеют одинаковые по величине угловые скорости. При этом величина угловой скорости первой пары дебалансов вдвое меньше величины угловой скорости второй пары. Первая пара вращается с угловой скоростью $\omega_1 = \omega$, а вторая с угловой скоростью $\omega_2 = 2\omega$. Вращение должно быть соответствующим образом синхронизировано и согласовано по фазе посредством либо зубчатой (шестеренной) передачи, либо ременной зубчатой передачи. Для определенности дальнейших рассуждений будем считать отношение $\frac{\omega_2}{\omega_1} = U = 2$, передаточным отношением передачи, синхронизирующей и согласовывающей по фазе их вращения в вибровозбудителе. Дебалансы, вращающиеся с равными по величине угловыми скоростями [10], имеют одинаковые по величине произведения неуравновешенной массы m на ее эксцентриситет r относительно оси вращения. Причем, дисбалансы дебалансов, вращающихся с частотой 2ω в четыре раза меньше величины дисбалансов дебалансов, вращающихся с частотой ω . Для упрощения дальнейших рассуждений условимся называть одноименными дебалансы, вращающиеся с равными по величине угловыми скоростями, а отрезок, соединяющий их оси вращения – межосевым расстоянием. Они расположены

симметрично относительно прямой, перпендикулярной их межосевому расстоянию. При таком расположении дебалансов вибровозбудитель возбуждает прямолинейно колеблющуюся силу, действующую вдоль прямой, являющейся осью симметрии расположения их осей вращения.

Методика исследований. Способ возбуждения несимметричных (негармонических) колебаний силы [4, 5, 11] основан на создании условий фазировки дебалансов, при которой развиваемые им центробежные силы инерции параллельны друг другу и направлены в одну сторону.

Следует отметить, что при исследовании использовалось также положение, согласно которому центробежные силы инерции одноименных дебалансов направлены вдоль прямой соединяющей оси вращения в противоположные стороны. Если при таком расположении дебалансов в вибровозбудителе будет обеспечено их вращение в противоположных направлениях, то это позволяет возбуждать прямолинейно колеблющуюся силу.

Результаты исследований. На рис. 1 представлена схема вибровозбудителя для возбуждения колебаний силы при начальном положении дебалансов, в котором их центробежные силы инерции параллельны друг другу и направлены в одну сторону.

Рассмотрим положение дебалансов, которое получено при их повороте из начального положения в течение произвольного интервала времени t . При этом медленно вращающиеся дебалансы поворачиваются на угол $\delta = \omega_1 t = t$, а быстро вращающиеся на угол $2\delta = \omega_2 t = 2t$.

При равномерном вращении развиваются центробежные силы инерции, соответственно сила инерции, развиваемая медленно вращающимся P_1 и сила инерции P_2 , развиваемая быстро вращающимся дебалансами:

$$P_1 = m_1 r_1 \omega_1^2 = m_1 r_1 \omega^2; \quad (1)$$

$$P_2 = m_2 r_2 \omega_2^2 = 4m_2 r_2 \omega^2, \quad (2)$$

где P_1, P_2 – сила инерции, развиваемая соответственно медленно вращающимся и быстро вращающимся



ющимся дебалансами, Н; m – масса дебаланса, кг; r – эксцентриситет относительно оси вращения, м; ω_1, ω_2 – угловая скорость, соответственно первой и второй пар дебалансов, рад/с;

На рис. 2 показано произвольное положение дебалансов после поворота из начального положения на углы δ и 2δ .

Разложим силу инерции каждого дебаланса на две взаимно перпендикулярные составляющие: вертикальную и горизонтальную. Горизонтальные составляющие сил инерции (рис. 2) взаимно уравниваются друг друга.

Алгебраическая сумма равнодействующих первой и второй пар дебалансов представляет собой результирующую силу, возбуждаемую вибровозбудителем, зависимость которой от угла их поворота имеет вид

$$P_{\Sigma} = 2m_1 r_1 \omega^2 \cos \delta + 8m_2 r_2 \omega^2 \cos 2\delta, \quad (3)$$

где P_{Σ} – результирующая сила, возбуждаемая вибровозбудителем, Н; δ – угол поворота дебаланса, град.

Результирующая сила P_{Σ} направлена вдоль прямой, являющейся осью симметрии расположения осей вращения дебалансов.

В известном вибровозбудителе [13] дисбаланс быстровращающегося дебаланса в четыре раза меньше дисбаланса медленновращающегося, то есть если дисбаланс быстровращающегося равен $m_1 r_1 = mr$, то дисбаланс медленновращающегося в этом случае равен $m_2 r_2 = 0,25mr$. Тогда результирующая сила, возбуждаемая вибровозбудителем, имеет следующий вид:

$$P_{\Sigma} = 2mr \omega^2 \cos \delta + 2mr \omega^2 \cos 2\delta. \quad (4)$$

Зависимость результирующей силы, возбуждаемой вибровозбудителем в безразмерном выражении, может быть записана в виде

$$p(\delta) = \frac{P_{\Sigma}}{2mr\omega^2} = \cos \delta + \cos 2\delta. \quad (5)$$

На рис. 3 представлена зависимость результирующей силы в безразмерном выражении от угла поворота дебалансов за цикл работы механизма

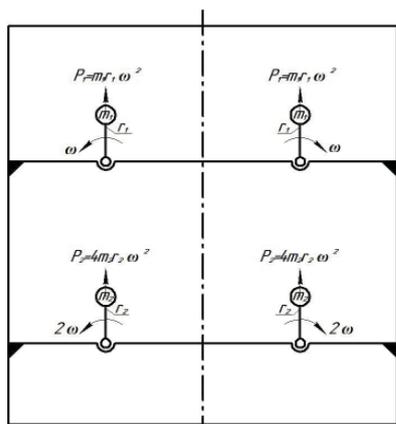


Рис. 1. Схема вибровозбудителя в начальном положении дебалансов

вибровозбудителя. Циклом работы механизма вибровозбудителя является время, по истечении которого дебалансы возвращаются в начальное положение. В рассматриваемом случае максимальные по величине равнодействующие силы создаются в начальном положении дебалансов.

Как видно из графика (см. рис. 3), зависимость результирующей силы от угла поворота дебалансов имеет наибольшее безразмерное значение равное 2, а наименьшее –1,125. Это означает, что наибольшие абсолютные значения силы, возбуждаемой вибровозбудителем в противоположных направлениях не равны друг другу. При принятом положительном и отрицательном направлениях силы абсолютная величина наибольшего значения возбуждаемой вибровозбудителем силы в положительном направлении больше абсолютной величины наибольшего значения силы в отрицательном направлении. Следовательно, в данном случае имеет место не симметрия закона колебаний силы, возбуждаемой вибровозбудителем.

При условии, что передаточное отношение передачи, синхронизирующей и согласовывающей по фазе вращения, равно двум и центробежные силы инерции возбуждают максимальные силы одинакового направления, одноименные дебалансы не занимают положение, в котором их центробежные силы инерции направлены вдоль прямой, соединяющей их оси вращения, то есть не занимают положение, в котором эти центробежные силы инерции одновременно создают силы равные нулю [3, 11]. Согласно этому заключению, особый интерес представляет начальное положение, в котором центробежные

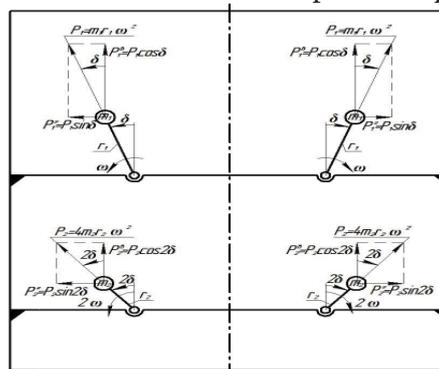


Рис. 2. Схема вибровозбудителя в произвольном положении дебалансов

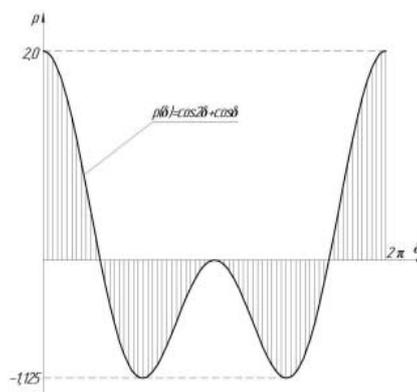


Рис. 3. Зависимость силы, возбуждаемой вибровозбудителем от угла поворота дебаланса, в начальном положении





силы инерции первой и второй пар дебалансов одновременно создают силы равные нулю.

Рассмотрим вибровозбудитель при условии, что в начальном положении центробежные силы инерции дебалансов, вращающихся с одинаковыми по величине угловыми скоростями, направлены вдоль прямой, соединяющей оси их вращения, навстречу друг другу.

Для определения зависимости силы, возбуждаемой вибровозбудителем, от угла поворота дебалансов рассмотрим произвольное положение, которое получено после их поворота из начального положения через произвольный интервал времени t . На рис. 4 представлена схема вибровозбудителя после поворота дебалансов из нового начального положения по истечении интервала времени t . Из рис. 4 видно, что горизонтальные составляющие сил инерции одноименных дебалансов взаимно уравновешивают друг друга.

На рис. 5 представлена зависимость результирующей силы, возбуждаемой вибровозбудителем, от угла поворота в безразмерном выражении за кинематический цикл механизма вибровозбудителя для случая, когда в начальном положении силы инерции одноименных дебалансов создают равнодействующую силу равную нулю. Как видно из рис. 5 данная зависимость имеет два положительных и два отрицательных экстремума. Эти экстремумы попарно равны друг другу по абсолютной величине.

При условии, что в начальном положении центробежные силы инерции создают максимальные силы положительного направления, сила, возбуждаемая вибровозбудителем, определяется по формуле

$$f(\delta) = \cos\delta + \cos U\delta, \quad (6)$$

где U – передаточное отношение передачи, синхронизирующей и согласовывающей по фазе вращения дебалансов; δ – угол поворота дебаланса, град.

Если в начальном положении центробежные силы инерции одноименных дебалансов создают силы равные нулю, то зависимость силы, возбуждаемой вибровозбудителем в безразмерном выражении имеет вид

$$f(\delta) = \sin\delta + \sin U\delta. \quad (7)$$

Если передаточное отношение является целым числом, то в течение кинематического цикла механизма вибровозбудителя медленно вращающиеся дебалансы делают один оборот, а число оборотов быстро вращающихся дебалансов равно величине передаточного отношения. Если передаточное отношение является целым числом, то сумма полных чисел оборотов медленно и быстро вращающихся дебалансов за кинематический цикл механизма вибровозбудителя будет четным числом, при условии, что передаточное отношение является нечетным числом. В качестве примера, иллюстрирующего это заключение на рисунке 6 представлена зависимость, возбуждаемой виб-

ровозбудителем силы от угла поворота, для случая, когда центробежные силы инерции медленно и быстро вращающихся дебалансов в начальном положении создают максимальные силы положительного направления, а передаточное отношение передачи, синхронизирующей и согласовывающей по фазе вращения дебалансов, равно трем.

Представленная зависимость (рис. 6) имеет наибольшее безразмерное значение равное двум и наименьшее – минус двум. Кроме того, сила, возбуждаемая вибровозбудителем, за период колебаний, имеет два положительных и два отрицательных экстремума, которые равны друг другу по абсолютной величине. Значения экстремумов в положительном и отрицательном направлениях соответственно равны $\pm 0,54$.

Заключение. Вибровозбудитель возбуждает колебания силы по несимметричному закону, если выполняются следующие условия: в начальном положении центробежные силы инерции медленно и быстро вращающихся дебалансов создают максимальные силы одинакового направления и сумма чисел их оборотов медленно за кинематический цикл механизма вибровозбудителя, является нечетным числом. Вибровозбудитель возбуждает симметричные колебания силы при выполнении одного из нижеперечисленных условий: сумма чисел оборотов медленно и быстро вращающихся дебалансов за кинематический цикл механизма вибровозбудителя, является четным числом; в начальном положении центробежные силы инерции медленно и быстро враща-

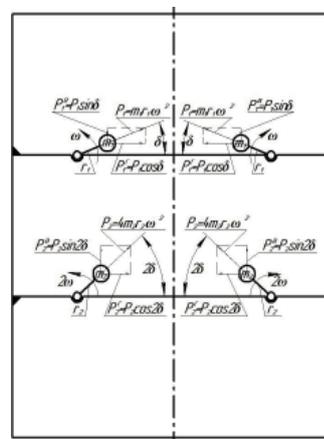


Рис. 4. Схема вибровозбудителя при произвольном расположении дебалансов

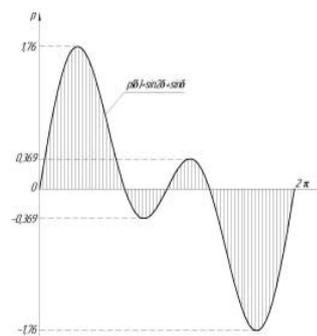


Рис. 5. Зависимость силы, возбуждаемой вибровозбудителем от угла поворота дебаланса в течение кинематического цикла

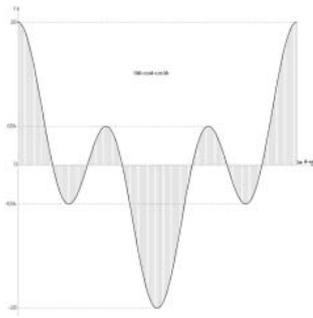


Рис. 6. Зависимость силы, возбуждаемой вибровозбудителем, от угла поворота дебаланса при условии, что $U=3$

ющихся дебалансов создают силы, равные нулю. Практическая реализация такого способа управления видом зависимости, возбуждаемой вибровозбудителем силы, открывает перспективу создания универсального привода вибрационного технологического и транспортного оборудования перерабатывающих предприятий [7, 12].

Применение механических колебаний силовых факторов с различными параметрами закона колебаний в вибрационных машинах пищевой промышленности для просеивания и сепарирования сыпучих пищевых продуктов, позволит усовершенствовать вибрационные горизонтальные или вертикальные конвейеры; дозаторы, ориентирующие устройства, вибрационные питатели, сепараторы, сортирующие и другие машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов С.Т., Бредихин С.А., Овсянников В.Ю. Индустриальные технологические комплексы пищевых производств. – СПб., 2020. – 440 с.
2. Блехман И.И. Что может вибрация?: О «вибрационной механике» и вибрационной технике. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 208 с.
3. 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 // Патент РФ № 2528550. 2012.
4. Васильев А.М., Бредихин С.А., Андреев В.К. Влияние начальной фазировки в центробежном вибровозбудителе на характеристики закона колебаний силового фактора // Научный журнал ИТМО серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2019. – № 1. – С. 27–35.
5. Васильев А.М., Бредихин С.А., Андреев В.К. К вопросу о вибрационном перемещении при негармонических колебаниях рабочей поверхности // На-

учный журнал ИТМО серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2019. – № 1. – С. 42–48.

6. Вибрации в технике: Справочник в 6 т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – Т. 4. Вибрационные процессы и машины / под ред. Э.Э. Лавендела. – М., 1981. – 509 с.

7. Вибропневмосепараторы и их использование в линиях очистки семян / В.Д. Галкин [и др.]; под общ. ред. В.Д. Галкина. – Пермь: ИПЦ «ПрокростЪ», 2014. – 102 с.

8. Процессы и аппараты пищевой технологии / под ред. С.А. Бредихина. – СПб., 2014. – 544 с.

9. Способ возбуждения механических колебаний силовых факторов с регулируемыми параметрами / А.М. Васильев, С.А. Бредихин, В.К. Андреев, Н.В. Андреева // Патент РФ РФ № 2697520. 2018.

10. Способ регулирования параметров закона механических колебаний силовых факторов в центробежном вибровозбудителе / А.М. Васильев, С.А. Бредихин, В.К. Андреев, Н.В. Андреева // Патент РФ РФ № 2697525. 2018.

11. Способ возбуждения негармонических колебаний момента в вибрационных сепарирующих машинах / А.М. Васильев, С.М. Васильев, С.А. Мачихин, Э.В. Абрамов, А.С. Волков, Д.В. Киракосян // Патент РФ № 2528271. 2012.

12. Федоренко И.Я. Вибрационные процессы и устройства в АПК. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2016. – 289 с.

13. Patentschrift № 955756 (DFR) KI. 8/e, Gr53, 10. 1.1957.

Васильев Александр Михайлович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты перерабатывающих производств», РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Россия.

Бредихин Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Процессы и аппараты перерабатывающих производств», РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Россия.

Андреев Владимир Константинович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты перерабатывающих производств», РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Россия.
127550, Россия, Москва, ул. Тимирязевская, 49.
Тел.: (8499) 977-92-73.

Рудик Феликс Яковлевич, д-р техн. наук, проф. кафедры «Технологии продуктов питания», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.
410005, г. Саратов, ул. Соколова, 335.
Тел.: (8452) 69-25-32.

Ключевые слова: центробежный вибровозбудитель; дебаланс; дисбаланс дебаланса; колебания силы; начальное положение дебалансов; центробежная сила инерции дебаланса.

STUDY OF THE PARAMETERS OF THE LAW OF THE FORCE VIBRATION EXCITED BY A CENTRIFUGAL VIBRATION EXCITER

Vasiliev Aleksandr Mikhailovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Processes and devices of processing industries", Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Russia.

Bredikhin Sergey Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the chair "Processes and devices of processing industries", Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Russia.

Andreev Vladimir Konstantinovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Processes and devices of processing industries", Russian State Agrarian University - Moscow

Timiryazev Agricultural Academy, Russia.

Rudik Phelix Yakovlevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the chair "Food Technology", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia.

Keywords: centrifugal vibration exciter; unbalance; unbalance imbalance; force fluctuations; initial position of unbalances; centrifugal force of unbalance inertia.

The article is devoted to the study of the parameters of the law of the force oscillations excited by a centrifugal vibration exciter of vibration machines.

