

18. Kadashevich, Yu. I. Theory of plasticity, taking into account microstresses [Text] / Yu. I. Kadashevich and Yu. A. Chernyakov // Advances in mechanics. – 1992. – Vol. 15, Issue 3–4. – P. 3–39.
19. Chernyakov, Yu. A. On extension of the phenomenological approach in the theory of plasticity [Text] / Yu. A. Chernyakov, A. S. Polishchuk and V. P. Shneider // Journal of Engineering Mathematics. – 2013. – Vol. 78, Issue 1. – P. 55–66. doi: 10.1007/s10665-011-9470-8
20. Onischenko, I. S. Numerical integration of the equations of the theory of creep, which taken into account the microstrains [Text] / I. S. Onischenko, Yu. A. Chernyakov, V. P. Shneider // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – 2014. – Вип. 22. – С. 281–290.
21. Dafalias, Y. F. The plastic spin in viscoplasticity [Text] / Y. F. Dafalias // International Journal of Solids and Structures. – 1990. – Vol. 26, Issue 2. – P. 149–163. doi: 10.1016/0020-7683(90)90048-z
22. Lee, E. H. Elastic–plastic deformations at finite strains [Text] / E. H. Lee // Journal of Applied Mechanics. – 1969. – Vol. 36, Issue 1. – P. 1–6. doi: 10.1115/1.3564580

Проведений огляд конструкцій двохчастотних збудників вібрацій. Запропоновано збуджувати такі вібрації пасивними автобалансирами з коригувальними вантажами у вигляді куль, роликів або маятників. Наведені приклади нових віброзбудників. Запропоновані кінематичні схеми машин з різним рухом платформи. Перевірено працездатність одного із запропонованих технічних рішень комп'ютерним 3D моделюванням динаміки вібромашини у комп'ютерній САПР SolidWorks

Ключові слова: віброзбудник, двохчастотні вібрації, дебаланс, резонансна вібромашина, автобалансир, коригувальний вантаж, грохот

Проведен обзор конструкций двухчастотных возбуждителей вибраций. Предложено возбуждать такие вибрации пассивными автобалансирами с корректирующими грузами в виде шаров, роликов или маятников. Приведены примеры новых вибровозбудителей. Предложены кинематические схемы машин с разным движением платформы. Проверена работоспособность одного из предложенных технических решений компьютерным 3D моделированием динамики вибромашины в компьютерной САПР SolidWorks

Ключевые слова: вибровозбудитель, двухчастотные вибрации, дебаланс, резонансная вибромашина, автобалансир, корректирующий груз, грохот

УДК 621.4.002.2: 629.73.002.72

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.47116

СПОСОБ ВОЗБУЖДЕНИЯ ДВУХЧАСТОТНЫХ ВИБРАЦИЙ ПАСИВНЫМИ АВТОБАЛАНСИРАМИ

Г. Б. Филимонихин

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: filimonikhin@yandex.ua

В. В. Яцун

Кандидат технических наук, доцент**

E-mail: yatsunvvr@mail.ru

*Кафедра деталей машин

и прикладной механики

**Кафедра строительных,

дорожных машин и строительства***

***Кировоградский национальный

технический университет

пр. Университетский, 8,

г. Кировоград, Украина, 25006

1. Введение

Среди вибрационных машин типа грохотов, вибросит, сепараторов перспективными являются машины с двухчастотными возбудителями вибраций [1]. В них при колебаниях платформы (решета, сита и т. п.) с более низкой частотой выполняется основной технологический процесс – сепарация, просеивание, очищение. Колебания с более высокой частотой обеспечивают:

1) самоочищение платформы [2];

2) изменение механических свойств обрабатываемого материала для увеличения интенсивности основного процесса.

Среди вибрационных машин наиболее энергоэффективны резонансные [3–5]. Так же в таких маши-

нах вибровозбудители с меньшей массой возбуждают колебания платформы с большей амплитудой [6]. Поэтому актуально создание и совершенствование резонансных вибрационных машин с двухчастотными возбудителями вибраций.

Наиболее полный обзор вибрационных машин с двухчастотными и многочастотными возбудителями вибраций проведен в работе [7], а вибровозбудителей – в [8]. Рассмотренные в обзорах вибровозбудители имеют сложные конструкции, их трудно подстроить под резонансную частоту колебаний платформы и т. д. Поэтому актуально разработать новый способ возбуждения двухчастотных вибраций в резонансных вибромашинах, устраняющий эти недостатки.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

По принципу работы возбудители делятся на [8]: электромагнитные – вибрации генерируются переменными силами притяжения электромагнитов; механические, в том числе центробежные – вибрации генерируются за счет движения масс, в том числе вращением нескольких дебалансов.

Электромагнитные вибровозбудители [9] надежны в работе, энергоэффективны, позволяют генерировать вибрации, амплитуды и частоты которых меняются в широких пределах. Однако они имеют сложность конструкции, обслуживания и управления, особенно в случае автоматической подстройки генерируемой частоты вибраций под резонансную частоту колебаний платформы.

Наиболее известны конструкции механических вибровозбудителей, приводной принцип которых основан на применении двух (нескольких) инерционных вибровозбудителей с разной частотой возбуждения вибраций [10]. При использовании для этого двух независимых приводов с разными скоростями вращения получается громоздкая конструкция. При использовании одного привода и связи между валами, несущими дебалансы (в виде редукторов, шестерен и т. п.) получается жесткая связь между возбуждаемыми частотами. В обоих случаях возникает сложность в обеспечении резонансных колебаний платформы.

В планетарных вибровозбудителях [11] сателлит (бегунок) приводится в движение поводком (водилом). Двухчастотные вибрации генерируются двумя способами. В первом способе [12] первая, более низкая частота, возбуждается поводком и сателлитом при обкатке сателлита по направляющей (при качении сателлита по центральному колесу). Вторая, более высокая частота, генерируется сателлитом при его собственном вращении за счет выполнения сателлита неуравновешенным (имеются отверстия в сателлите). Во втором способе [13] первая, более низкая частота, возбуждается, как и в первом способе. Вторая, более высокая частота, возбуждается за счет выполнения на направляющей выступов, о которые бьётся сателлит во время качения. Недостатками конструкций являются жесткая связь между двумя частотами колебаний и сложность подстройки низшей частоты под резонансную частоту колебаний платформы.

В работе [14] предложена многочастотная адаптерная система «Крушер®» – полностью механическая система. По заявлению производителя, вибрация, создаваемая мотором (или вибромоторами), передается по корпусу платформы на многочастотные адаптеры, где усиливается в 200–400 раз, преобразуется из одночастотной (гармонической) в многочастотную (негармоническую) и возбуждает колебания рабочего органа машины. Такое изобретение имеет существенные недостатки: сложность конструкции, ограниченность типоразмерного ряда небольшими по площади образцами, высокую стоимость. Также в описании изобретения (и литературе) не обоснована работоспособность многочастотных адаптеров.

Известны комбинированные бигармонические возбудители [15, 16]. Первая – рабочая частота колебаний платформы генерируется инерционным вибровозбудителем, а вторая – для очищения сита – генерируется

электромагнитным вибровозбудителем или вибратором импульсного воздействия. Рассмотренные решения имеют ряд недостатков: сложность конструкций, отсутствие автоматической подстройки частоты возмущающих сил под резонансную частоту колебаний платформы.

3. Цель работы и задачи исследований

Целью работы является разработка нового способа возбуждения двухчастотных вибраций в резонансных вибромашинах с использованием пассивных автобалансиров.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи исследований:

- разработать новые конструкции двухчастотных возбудителей вибраций и привести примеры их применения;
- предложить кинематические схемы машин с разным движением платформы, на которые могут быть установлены двухчастотные вибровозбудители;
- проверить работоспособность одного из предложенных технических решений с применением компьютерного 3D моделирования.

4. Методы исследований для разработки новой конструкции двухчастотных вибровозбудителей и проверки их работоспособности

Для решения первой и второй задач исследований используются результаты теории роторных систем с автобалансирами, теория квазипериодических движений таких систем, элементы теории вибрационных машин. Для решения третьей задачи исследований используется 3D моделирование в компьютерной САПР SolidWorks с применением модуля Cosmos Motion.

5. Результаты исследований по разработке новой конструкции двухчастотных вибровозбудителей и проверки их работоспособности

5. 1. Конструкции двухчастотных вибровозбудителей и вибрационных машин

Для возбуждения двухчастотных вибраций в работе [17] впервые предложено использовать пассивные автобалансиры (АБ) (рис. 1, а, б). АБ предназначены для уравновешения быстровращающихся роторов на ходу [18]. В нормально работающем АБ его корректирующие грузы (КГ) со временем сами приходят в положение, в котором уравновешивают ротор и далее вращаются с ним как одно целое. КГ могут быть в виде шариков, роликов или маятников (рис. 1, а, б).

В работе [19] был обнаружен особый режим движения ротора с АБ – квазипериодический, возникающий при малых силах сопротивления движению КГ относительно ротора. В этом режиме ротор вращается со скоростью, превышающей резонансные скорости вращения ротора, а КГ в АБ не могут догнать ротор, собираются вместе или частично расходятся, и вращаются вокруг продольной оси ротора относительно земли с одной из его резонансных частот вращения.

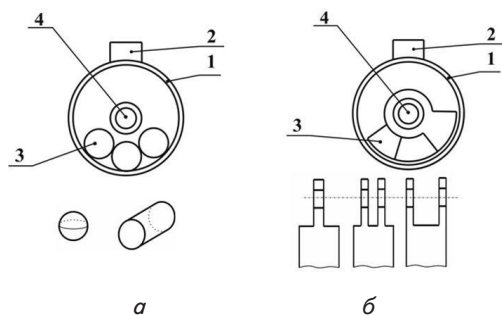


Рис. 1. Двухчастотный вибровозбудитель: *а* – шариковый или роликовый; *б* – маятниковый: 1 – корпус АБ; 2 – дебаланс; 3 – КГ; 4 – вал

Двухчастотный вибровозбудитель (рис. 1) состоит из корпуса АБ 1, дебаланса 2, установленного на корпусе, КГ 3. Корпус АБ насаживается на вал 4. КГ могут быть шарами, роликами (рис. 1, *а*) или маятниками (рис. 1, *б*).

В первом варианте использования (рис. 2) один из описанных вибровозбудителей насаживается на вал 4 электродвигателя 5. Электродвигатель устанавливается на платформу, вибрация которой возбуждается.

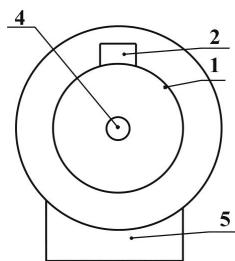


Рис. 2. Двухчастотный вибровозбудитель, совмещенный с электродвигателем: 1 – корпус АБ; 2 – дебаланс; 4 – вал; 5 – электродвигатель

Во втором варианте использования (рис. 3, *а*) один из описанных выше АБ 1 с дебалансом 2 на корпусе насаживается на вал 4, удерживаемый жесткими опорами 6. Вал приводится во вращение при помощи ременной передачи 7. Вибратор устанавливается на платформу, вибрация которой возбуждается путем закрепления на платформе опор.

В третьем варианте использования, в отличие от второго, вал 4 приводится во вращение от электродвигателя 5 при помощи муфты 8 (рис. 3, *б*).

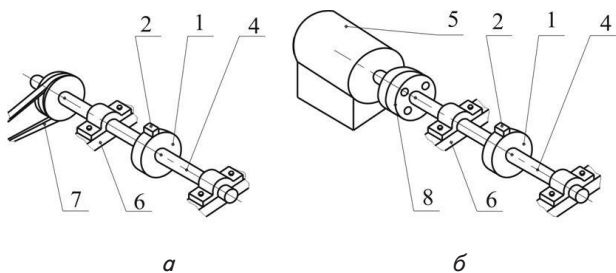


Рис. 3. Двухчастотный вибровозбудитель, приводящийся во вращение при помощи: *а* – ременной передачи; *б* – муфты: 1 – корпус АБ; 2 – дебаланс; 4 – вал; 5 – электродвигатель; 6 – опора; 7 – ременная передача; 8 – муфта

Описанные выше возбудители вибраций можно использовать в вибромашинах с различным движением платформы (рис. 4, *а–д*).

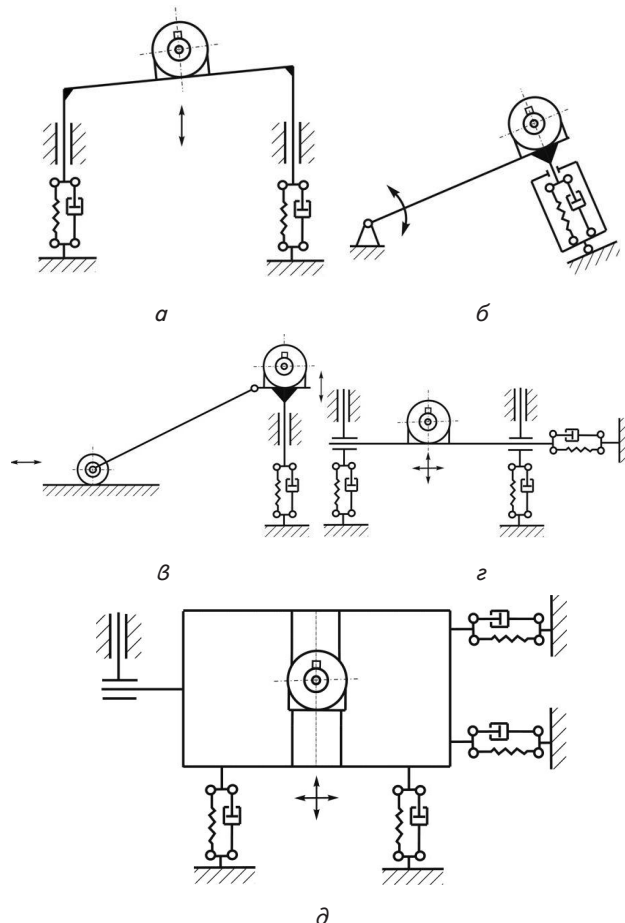


Рис. 4. Вибромашины, у которых платформа движется: *а* – поступательно прямолинейно; *б* – вращательно; *в* – поступательно-вращательно в вертикальной плоскости; *г* – поступательно в вертикальной плоскости; *д* – поступательно в горизонтальной плоскости

Заметим, что:

– работоспособность схемы на рис. 4, *д* проверена на примере квазипериодических колебаний корпуса стиральной машины при вращении центрифуги с шаровым АБ [19];

– двигатель в схемах на рис. 4, *а–в* можно повернуть на 90° (ось вращения вала двигателя можно ориентировать вдоль или поперек платформы).

Использование АБ для возбуждения двухчастотных вибраций дает следующие преимущества. Независимо от загрузки грохота КГ будут автоматически застревать на резонансной частоте колебаний платформы, чем будут подстраиваться под нее. Этим будут возбуждаться более медленные резонансные колебания платформы (8–15 Гц). Сам разбалансированный ротор можно вращать с любой зарезонансной скоростью вращения, чем будут возбуждаться более быстрые колебания платформы.

Рассмотрим работу АБ на примере схемы с поступательным прямолинейным движением платформы (рис. 4, *а*). АБ будет работать в качестве возбудителя двухчастотных вибраций следующим

образом. Во время пуска вала КГ собраны вместе, постепенно захватываются в движение, не могут догнать вал и значительно отстают от него. Когда вал набирает рабочую скорость вращения ω_v КГ также собраны вместе, вращаются со скоростью $\omega_{кг}$, отстают от вала, чем создают вибрации в вертикальном направлении с резонансной частотой колебаний платформы ($\omega_{кг}$). Дебаланс на корпусе АБ создает аналогичные вибрации, но с частотой вращения вала ω_v .

Независимо от загрузки платформы КГ в АБ будут автоматически подстраиваться под резонансную частоту колебаний платформы, причем в зависимости от нагрузки эта частота может меняться.

5. 2. Проверка технических решений 3D моделированием

Для проверки предложенных технических решений, в САПР Solidworks с применением модуля Motion, была создана 3D модель вибрационной машины (грохота) с вибровозбудителем в виде шарового АБ (рис. 5) [20].

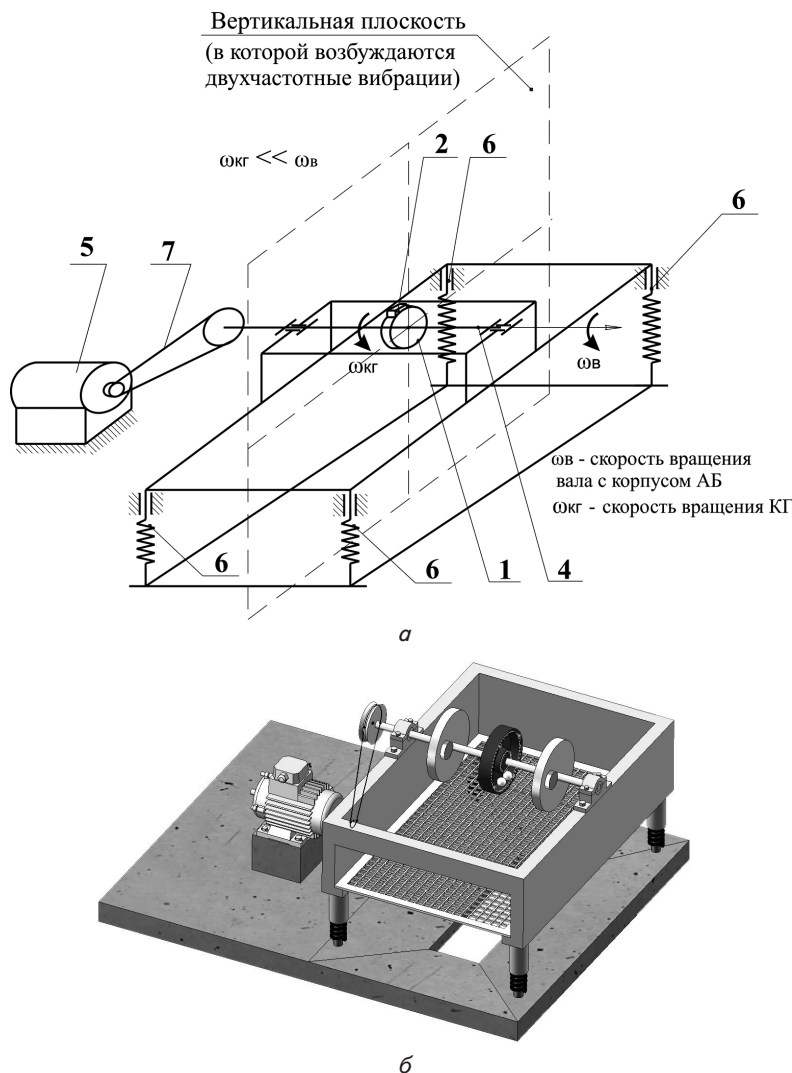


Рис. 5. Модель вибрационной машины: а – механическая; б – 3D модель: 1 – корпус АБ; 2 – дебаланс; 4 – вал; 5 – электродвигатель; 6 – опора; 7 – ременная передача

После подбора рациональных параметров (методом проб) был установлен режим работы АБ, при котором шары отстают от ротора (рис. 6).

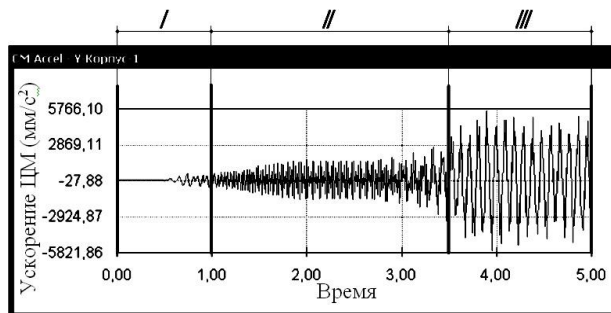


Рис. 6. Диаграмма виброускорений центра масс платформы

Данный график можно условно поделить на три участка: I – разгона ротора; II – переходных процессов до наступления двухчастотных колебаний; III – двухчастотных колебаний.

При моделировании работы грохота с АБ основные параметры изменялись следующим образом. Сначала при постоянной частоте вращения ротора $\omega=50$ об/с и постоянном дебалансе на корпусе АБ $m_k=10$ г изменялась масса дебалансов в пределах $m=10-70$ г (рис. 7, а-в).

Затем при постоянной массе дебалансов $m=40$ г изменялась частота вращения ротора в пределах $\omega=25-75$ об/с (рис. 8, а-в).

Увеличенные изображения участка III на диаграммах виброускорений (рис. 7, 8) свидетельствуют о наличии двух частот колебаний платформы: от неуравновешенности ротора и от шаров АБ. Следует отметить, что именно виброускорения создают силы, воздействующие на обрабатываемый материал. Характеристики этих сил можно менять в широких пределах изменением:

- суммарной массы КГ (изменяется амплитуду медленных колебаний платформы, обеспечивающих выполнение основного технологического процесса);
- массы на корпусе АБ (изменяет амплитуду быстрых колебаний платформы, обеспечивающих ее самоочищение и изменение механических свойств обрабатываемого материала);
- частоты вращения вала (пропорционально ее квадрату изменяется энергия быстрых колебаний, чем увеличивается энергия, направляемая на самоочищение платформы или изменение свойств обрабатываемого материала).

Таким образом, проведенное 3D моделирование полностью подтверждает работоспособность предложенного технического решения.

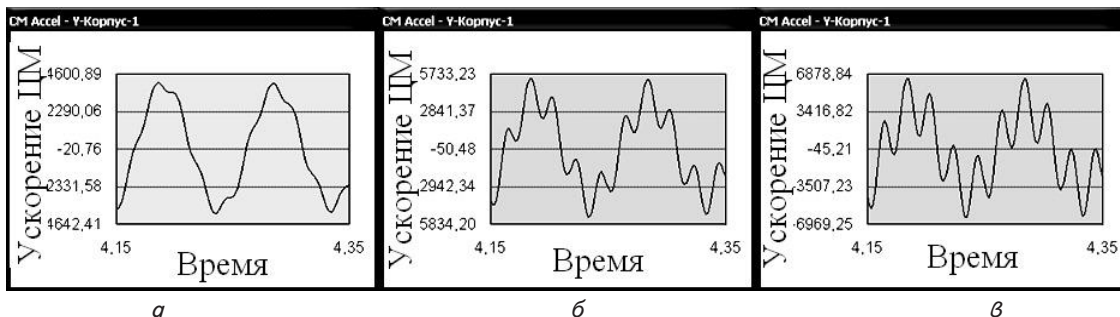


Рис. 7. Влияние массы дебаланса на виброускорения ЦМ платформы ($\omega=50$ об/с, $m_k=10$ г):
 а – $m=10$ г; б – $m=40$ г; в – $m=70$ г

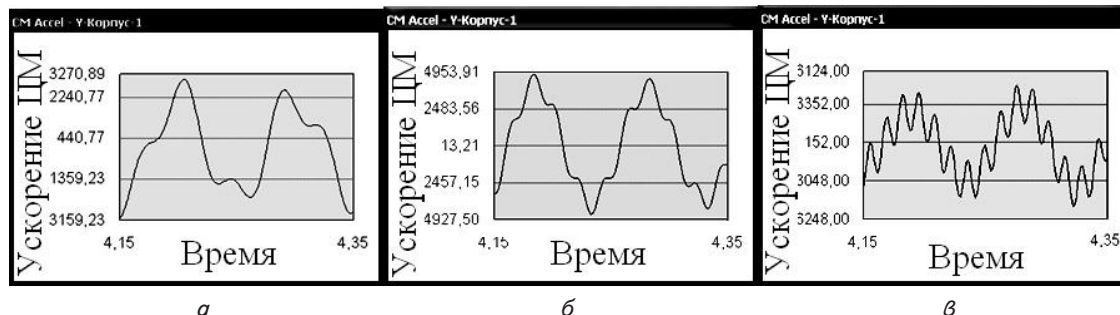


Рис. 8. Влияние частоты вращения ротора на виброускорения ЦМ платформы ($m=40$ г):
 а – $\omega=25$ об/с; б – $\omega=50$ об/с; в – $\omega=75$ об/с

6. Обсуждение результатов разработки новой конструкции двухчастотных вибровозбудителей и проверки их работоспособности

Предложенные конструкции двухчастотных вибровозбудителей имеют следующие преимущества перед известными. Низшая возбуждаемая частота автоматически подстраивается под резонансную частоту колебаний платформы, а высшая – может быть любой (определяется скоростью вращения вала). Интенсивность отдельных составляющих вибраций в широких пределах меняется изменением суммарной массы КГ в АБ и изменением массы на корпусе АБ. Поэтому эти вибровозбудители наиболее компактны, просты в изготовлении и обслуживании.

Новые вибровозбудители могут возбуждать двухчастотные вибрации в машинах с разной кинематикой движения платформы.

3D моделирование, проведенное для конкретного технического решения, подтвердило: возбуждение новым вибровозбудителем устойчивых двухчастотных вибраций платформы; возможность изменения их характеристик в широких пределах; автоматическую подстройку низшей возбуждаемой частоты (движения КГ) под резонансную частоту колебаний платформы независимо от ее загрузки.

Применение новых вибровозбудителей позволит создать новые вибромашины с двухчастотными колебаниями платформы. Энергоэффективность этих машин будет обеспечена тем, что низшая частота колебаний платформы будет совпадать с ее резонансной частотой колебаний. Интенсификация технологических процессов будет обеспечена самоочищением сита, изменением механических свойств обрабатываемого материала быстрыми вибрациями. Частоту этих ви-

браций можно менять в широких пределах, изменяя скорость вращения вала.

Хотя 3D моделирование было проведено только для одного технического решения, его результаты дают полное представление о принципе работы новых вибровозбудителей. При проектировании вибровозбудителей для конкретных вибромашин возникает задача подбора их параметров. В данной работе, из-за исследования упрощенной модели, такая задача не решалась. В дальнейшем планируется проведение натурных экспериментов на стенде, для сопоставления с результатами численного эксперимента. Также планируется создание 3D модели серийного грохота марки ГИЛ 42 и проведение многофакторного эксперимента по методике работы [21] с целью определения оптимальных параметров конкретной серийной машины для быстрого наступления двухчастотного колебательного движения.

7. Выводы

1. В работе предложено использовать шаровые, роликовые и маятниковые автобалансиры в качестве возбудителей двухчастотных вибраций, разработаны соответствующие конструкции.
2. Предложены кинематические схемы машин с разным движением платформы (плоское или прямолинейное поступательное, колебательно-вращательное, плоскопараллельное и т. д.), на которые можно устанавливать двухчастотные вибровозбудители.
3. Проведенные с помощью 3D моделирования исследования подтвердили возможность использования автобалансиры для возбуждения двухчастотных колебаний в резонансных вибрационных машинах и возможность

изменения в широких пределах характеристик вибраций массы на корпусе автобалансира, частоты вращения изменением суммарной массы корректирующих грузов, вала, на который насажен автобалансир.

Литература

1. Азбель, Г. Г. Вибрации в технике [Текст]. Т. 4. Вибрационные процессы и машины: справочник; в 6-ти т. / Г. Г. Азбель, И. И. Блехман, И. И. Быховский и др.; под общ. ред. Э. Э. Лавендела. – М.: Машиностроение, 1981. – 509 с.
2. Dual frequency vibratory screen for classifying granular material [Text]: Patent US 4482455 USA / Cecil T. Humphrey (USA). – Appl. № US 06/367,122. Filed 09.04.1982. Published 13.11.1984.
3. Гурський, В. М. Забезпечення двочастотних резонансних режимів роботи вібраційного стола для ущільнення бетоноsumішей [Текст] / В. М. Гурський, І. В. Кузьо, О. В. Ланець // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Динаміка, міцність та проектування машин і приладів». – 2010. – № 678. – С. 44–51.
4. Картавий, А. Н. Ресурсосберегающие принципы конструирования технологических вибрационных машин [Текст] / А. Н. Картавий // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – № 3. – С. 28–37.
5. Ланець, О. С. Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення) [Текст]: монографія / О. С. Ланець. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2008. – 324 с.
6. Кошелев, А. В. Исследование эффективности параметрического резонансного привода для совершенствования вибрационных мельниц [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А. В. Кошелев. – Нижний Новгород, 2014. – 125 с.
7. Букин, С. Л. Интенсификация технологических процессов вибромашин путем реализации бигармонических режимов работы [Текст]: науч.-техн. сб. / С. Л. Букин, С. Г. Маслов, А. П. Лютый, Г. Л. Резниченко // Обогащение полезных ископаемых. – 2009. – Вып. 36–37 (77–78). – С. 81–89.
8. Вибровозбудитель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \www/URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Вибровозбудитель>. – Загл. с экрана.
9. Electromagnetic vibrator with V-shaped working face of air gap [Text]: Patent CN 2098971 / Zongzhan Liu (CN), Fuhua Jia (CN); assignee: Chaoyang vibration machinery. – Appl. № CN2098971 U. Filed 18.12.1990. Published 18.03.1992.
10. RHEWUM DF Грохота типа Тур DF просеивают фракции от средней до грубой зернистости [Электронный ресурс] / RHEWUM GmbH. – Режим доступа: \www/URL: <http://www.rhewum.com/ru/produkty/dvukhchastotnye-proseivajushchie-mashiny/rhewum-df.html>
11. Дудкин, М. В. Общая классификация конструкций асимметричных планетарных вибровозбудителей дорожных машин [Текст] / М. В. Дудкин, М. А. Сакимов, П. С. Кузнецов // Вестник ВКГТУ им. Д. Серикбаева. – 2005. – № 1. – С. 37–44.
12. Одновалный планетарный вибратор направленных колебаний [Текст]: пат. № 2515336 Российская Федерация, В06В1/00 / Герасимов М. Д., Герасимов Д. М., Исаев И. К., Шарпов Р. Р. (Российская Федерация); БГТУ. – заявл. 01.08.2012; опубл. 10.05.2014, Бюл. № 1.
13. Надутый, В. П. Геометрия и кинематика взаимодействия в системе «валок - ось валька» с ударными элементами [Текст] / В. П. Надутый, В. И. Перехрест, И. В. Ягнюкова // Вибрации в технике и технологиях. – 2014. – № 2 (74). – С. 29–33.
14. Багаточастотна вібраційна сепарувальна система, вібраційний сепаратор і спосіб вібраційної сепарації [Текст]: пат. № 74544 С2 Україна, В07В 1/42 / Краш Іона, Ободан Юрій; Вібтек Енджінієринг Лтд. – заявл. 28.03.2000; опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1. – 27 с.
15. Надутый, В. П. Повышение эффективности процесса удаления влаги при тонком грохочении горной массы за счет импульсного воздействия [Текст] / В. П. Надутый, Е. С. Лапшин, А. И. Шевченко, А. В. Буров // Науковий вісник НГУ. – 2011. – № 2. – С. 95–99.
16. Лапшин, Е. С. Пути совершенствования вибрационного разделения по крупности и обезвоживания минерального сырья [Текст] / Е. С. Лапшин, А. И. Шевченко, А. В. Буров // Науковий вісник НГУ. – 2013. – № 3. – С. 45–51.
17. Застосування пасивного автобалансира як збудника кругових двочастотних вібрацій [Текст]: пат. № 92337 U Україна, F04D 29/66. Філімоніхін Г. Б., Яцун В. В. (Україна); КНТУ. – заявл. 18.03.2014; опубл. 11.08.2014, Бюл. № 15. – 4 с.
18. Блехман, И. И. Синхронизация динамических систем [Текст] / И. И. Блехман. – М.: Наука, 1971. – 896 с.
19. Філімоніхін, Г. Б. Зрівноваження і віброзахист роторів автобалансирами з твердими коригувальними вантажами [Текст]: монографія / Г. Б. Філімоніхін. – Кіровоград: КНТУ, 2004. – 352 с.
20. Филимоныхин, Г. Б. 3D моделирование возбуждения автобалансиrom двухчастотных колебаний платформы грохота с использованием Solidworks и Cosmos motion [Текст] / Г. Б. Филимоныхин, В. В. Яцун // Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2014. – Чернівці: ЧДПЕУ, 2014. – С. 218–221.
21. Филимоныхин, Г. Б. Оптимизация параметров центробежной соковыжималки с автобалансиrom минимизацией времени наступления автобалансировки [Текст] / Г. Б. Филимоныхин, В. В. Гончаров // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 2/7 (68). – С. 28–32. doi:10.15587/1729-4061.2014.23317