

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 631.363.21

DOI: 10.53083/1996-4277-2021-205-11-86-93

И.Я. Федоренко, А.М. Левин, А.В. Табаев

I.Ya. Fedorenko, A.M. Levin, A.V. Tabaev

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ПРОЯВЛЯЮЩИЕСЯ В МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ВИБРАЦИОННОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ КОРМОВОГО ЗЕРНА

### DYNAMIC EFFECTS OCCURRING IN THE MECHANICAL SYSTEM OF VIBRATORY FODDER GRAIN CRUSHER

**Ключевые слова:** *вибрационная дробилка, кормовое зерно, механическая система, антирезонанс, синхронизация вибровозбудителей, эксперимент.*

В механической системе предлагаемого измельчителя кормового зерна проявляются два динамических эффекта: антирезонанс двухмассной системы и самосинхронизация неуравновешенных роторов. Указанные эффекты, осуществляемые одновременно в одной машине, постоянно «воюют» между собой. Действительно, антирезонанс приводит к малости колебаний первой массы, к которой жестко прикреплены вибровозбудители. Самосинхронизация же вибровозбудителей требует больших колебаний этой массы, как общего несущего тела, через колебания которого и осуществляется самосинхронизация. С другой стороны, в теории синхронизации известен парадокс неработающих связей, утверждающий, что при синхронизации вибровозбудителей несущее тело может быть неподвижным и начинает колебаться лишь в том случае, если синхронная фазировка роторов по каким-либо причинам нарушается. Поэтому *целью работы* является экспериментальное подтверждение совместного проявления и «сосуществования» этих эффектов в предложенном измельчителе, а также изучение возможности их использования в технологических целях. При этом получена математическая модель колебаний рабочих органов вибрационного измельчителя фуражного зерна, учитывающая его конструктивные особенности и взаимодействие рабочих органов с технологической средой. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что в механической системе вибрационного измельчителя кормового зерна проявляются два динамических эффекта: антирезонанс двухмассной системы и самосинхронизация неуравновешенных роторов. Испытания экспериментального образца измельчителя показали, что указанные эффекты полезны для технологического процесса, стабильны и сосуществуют вме-

сте. В целом эксперименты показывают работоспособность динамической схемы измельчителя с получением достаточных размахов колебаний рабочих органов. Вращения роторов вибровозбудителей носят синхронно-синфазный характер, что положительно сказывается на функционировании измельчителя.

**Keywords:** *vibrational crusher, fodder grain, mechanical system, anti-resonance, synchronization of vibration exciters, experiment.*

In the mechanical system of the proposed fodder grain grinder, two dynamic effects are manifested: anti-resonance of a two-mass system and self-synchronization of unbalanced rotors. These effects occurring simultaneously in one machine are constantly opposed to each other. Indeed, anti-resonance leads to small vibrations of the first mass to which the vibration exciters are rigidly attached. Self-synchronization of vibration exciters requires large oscillations of this mass as a common carrier body through the oscillations of which self-synchronization is carried out. On the other hand, in the theory of synchronization, the paradox of inoperative connections is known which states that during synchronization of vibration exciters the carrier body may be motionless and begins to oscillate only if the synchronous phasing of the rotors is violated for some reason. Therefore, the research goal is to experimentally confirm the joint manifestation and “coexistence” of these effects in the proposed crusher, as well as to study the possibility of their use for technological purposes. A mathematical model of vibrations of the working bodies of a vibratory fodder grain crusher was obtained taking into account its design features and the interaction of the working bodies with the technological environment. It is theoretically determined and experimentally confirmed that in the mechanical system of a vibratory fodder grain crusher, two dynamic effects are manifested: anti-resonance of a two-mass system and self-synchronization of unbalanced ro-

tors. The tests of a prototype crusher have shown that these effects are beneficial to the process, stable, and co-exist. On the whole, the experiments show the efficiency of the dynamic crusher circuit with obtaining sufficient swing

ranges of the working bodies. The rotations of the vibration exciter rotors are synchronous-cophased that has a positive effect on the functioning of the crusher.

**Федоренко Иван Ярославович**, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: ijfedorenko@mail.ru.

**Левин Алексей Михайлович**, к.т.н., ООО «Сибирская технологическая компания», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: Lev-alex@mail.ru.

**Табаев Алексей Викторович**, аспирант, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: Prom\_resh@mail.ru.

**Fedorenko Ivan Yaroslavovich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: ijfedorenko@mail.ru.

**Levin Aleksey Mikhaylovich**, Cand. Tech. Sci., ООО «Sibirskaya tekhnologicheskaya kompaniya», Barnaul, Russian Federation, e-mail: Lev-alex@mail.ru.

**Tabaev Aleksey Viktorovich**, post-graduate student, Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: Prom\_resh@mail.ru.

### Введение

Известно, что вибрационные технологические машины весьма просты по устройству, однако сложность протекающих в них процессов очень велика. Не является исключением и измельчитель кормового зерна с вибрационными рабочими органами, предложенный в Алтайском ГАУ [1]. В механической системе этого измельчителя проявляются два удивительных эффекта: антирезонанс двухмассной системы и самосинхронизация неуравновешенных роторов.

*Первый эффект* проявляется в том, что при двухмассной системе измельчителя та масса, на которой укреплены вибровозбудители, в процессе осуществления технологического процесса практически не колеблется. При этом другая масса без активного привода совершает интенсивные колебания.

*Второй эффект* – самосинхронизация неуравновешенных роторов (роторов, ось вращения которых не проходит через их центр масс) обусловлена тем, что два ротора вибровозбудителей, кинематически и электрически не связанных между собой, установленные на общем подвижном основании (первой массе) и приводимые в движение от независимых асинхронных двигателей, вращаются синхронно с одинаковыми средними угловыми скоростями и с определенными взаимными фазами.

Указанные эффекты, осуществляемые одновременно в одной машине, постоянно «воюют» между собой. Действительно, антирезонанс приводит к малости колебаний первой массы, к которой жестко прикреплены вибровозбудители. Самосинхронизация же вибровозбудителей требует больших колебаний этой массы, как общего несущего тела, через колебания которого и осуществляется самосинхронизация. С другой стороны, в теории синхронизации известен па-

радокс неработающих связей, утверждающий, что при синхронизации вибровозбудителей несущее тело может быть неподвижным и начинает колебаться лишь в том случае, если синхронная фазировка роторов по каким-либо причинам нарушается.

*Целью* работы является экспериментальное подтверждение совместного проявления и «существования» этих эффектов в предложенном измельчителе, а также изучение возможности их использования в технологических целях.

### Объект и методы исследования

Рабочие органы измельчителя (рис. 1) включают активный элемент в виде корзины 1 с установленными на ней вибровозбудителями 2, а также пассивный элемент 3, представляющий собой массивный маятник 3, кинематически связанный с активным элементом 1 в точке подвеса 4 [1-3]. Роторы вибровозбудителей вращаются во встречных направлениях.

Активный элемент 1 может совершать угловые колебания в плоскости чертежа, поскольку снабжен шарнирным подвесом 5. Сверху всей конструкции установлен бункер 6, в который засыпается исходное фуражное зерно.

В процессе измельчения зерно истекает из бункера 6 и попадает в активные зоны между рабочими органами 1 и 3, под воздействием которых исходное зерно измельчается. Степень измельчения зерна регулируется изменением кинетических моментов дебалансов, которыми оснащены центробежные вибровозбудители 2.

Подобные конструкции успешно применяются при дроблении различных горных пород [4].

В целом конструкция данного измельчителя представляет собой симметричную систему с двумя осями симметрии. В таких системах центробежные вибровозбудители всегда самосин-

хронизируются [5], поэтому можно считать, что активный элемент 1 (корзина) находится под действием суммарной вынуждающей силы двух центробежных вибровозбудителей (рис. 1)

$$\Phi = 2\Phi_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $\Phi_0 = m_D \varepsilon \omega^2$  – центробежная сила одного вибровозбудителя ( $m_D, \varepsilon, \omega$  – масса, эксцентриситет дебаланса и угловая скорость дебалансного вала).

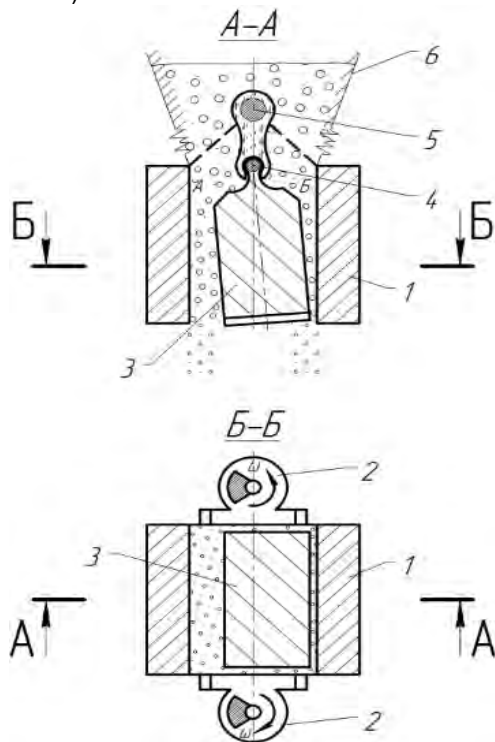


Рис. 1. Схема работы вибрационного измельчителя фуражного зерна

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_1 + 2n_1(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + \omega_{12}^2(\varphi_1 - \varphi_2) + \omega_{01}^2\varphi_1 = K_1 \cdot \omega^2 \sin \omega t; \\ \ddot{\varphi}_2 + 2n_2(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) + \omega_{21}^2(\varphi_2 - \varphi_1) + \omega_{02}^2\varphi_2 = -K_2 \ddot{\varphi}_1, \end{cases} \quad (2)$$

где  $n_1 = \frac{bL}{2I_1}; n_2 = \frac{bl}{2I_2}; \omega_{01} = \sqrt{\frac{MgL}{I_1}}; \omega_{02} = \sqrt{\frac{cL}{I_2}}; \omega_{12} = \sqrt{\frac{cL}{I_1}};$

$$\omega_{21} = \sqrt{\frac{cl}{I_2}}; K_1 = \frac{2m_D \cdot \varepsilon \cdot L}{I_1}; K_2 = \frac{m_z l(L-l)}{I_2};$$

$I_1$  – момент инерции системы относительно точки  $O_1$ ;

$M = m_1 + m_2 + 2m_D$  – суммарная масса первого и второго маятников, а также двух дебалансов;

$b, c$  – коэффициенты, отражающие вязкие и упругие свойства зернового слоя (остальные обозначения см. на рисунке 2).

Величины  $\omega_{12}$  и  $\omega_{21}$  имеют размерность угловой частоты колебаний. Они выражают парциальные добавки, обусловленные упругостью зернового слоя, к парциальным частотам  $\omega_{01}$  и  $\omega_{02}$  свободных колебаний маятников в поле силы тяжести.

Уравнения (2) и (3) представляют собой математическую модель колебаний рабочих орга-

Расчетную динамическую схему вибрационного измельчителя представим в виде двойного маятника (рис. 2). Первый маятник, подвешенный в точке  $O_1$ , составляет невесомая пластина 1 с жестко прикрепленным к ней активным элементом (корзиной) 2. Второй (пассивный) маятник образует массивная пластина 3, закрепленная в точке подвеса  $O_2$ . Вся конструкция в целом и маятники в отдельности могут совершать угловые колебания в плоскости чертежа.

Измельченное фуражное зерно – относительно мягкий материал, демонстрирующий упругие и вязкие свойства. Поэтому слой фуражного зерна, подвергаемый сжатию и измельчению в зазоре рабочих органов 2 и 3, моделируем в виде упругих и вязких элементов (рис. 2). Подобный подход принят в работе [6].

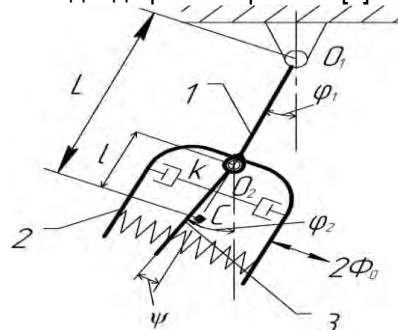


Рис. 2. Расчетная схема угловых колебаний рабочих органов измельчителя

### Результаты исследований и их обсуждение

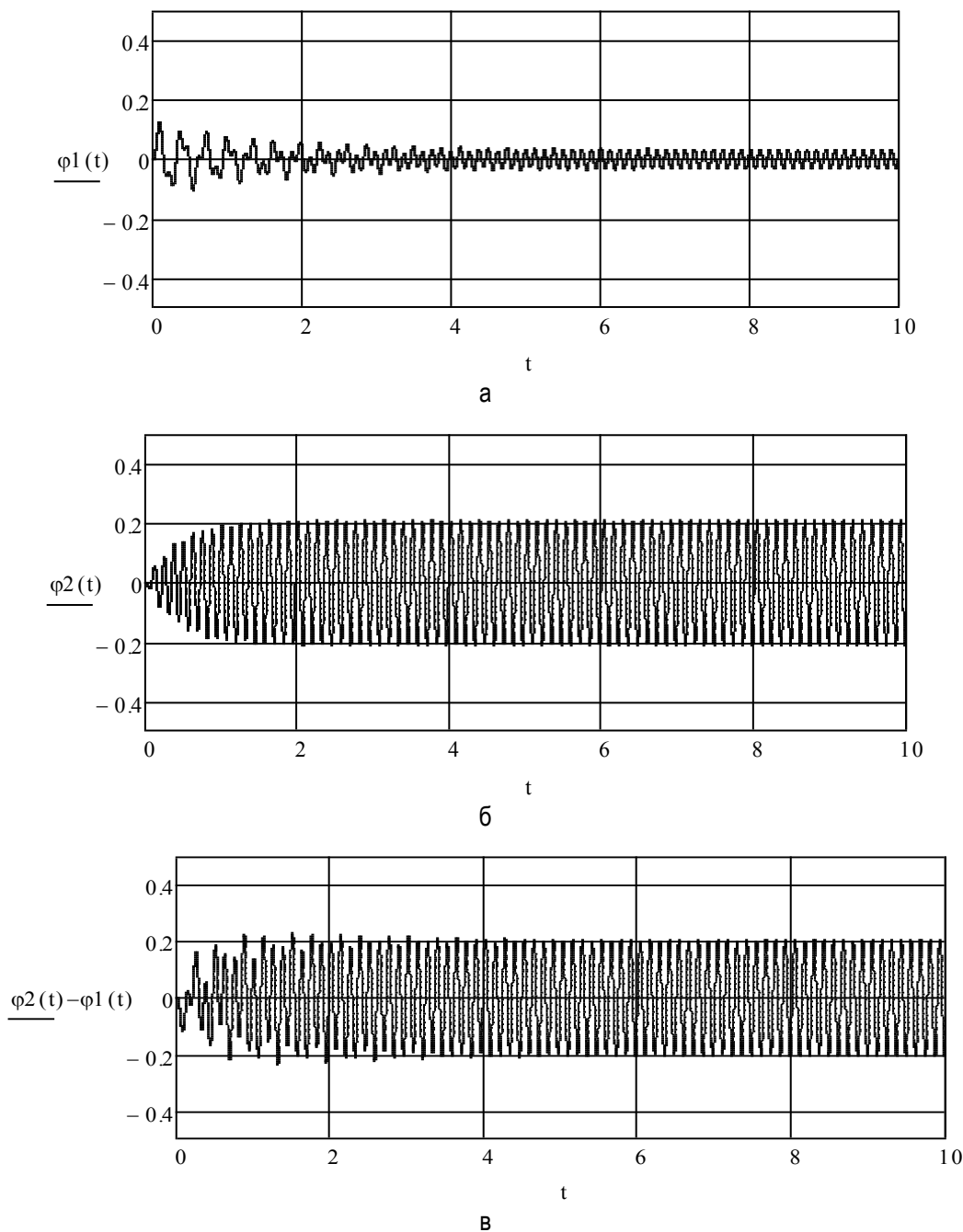
Полученные в статье [6] дифференциальные уравнения движения маятников измельчителя имеют вид

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_1 + 2n_1(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + \omega_{12}^2(\varphi_1 - \varphi_2) + \omega_{01}^2\varphi_1 = K_1 \cdot \omega^2 \sin \omega t; \\ \ddot{\varphi}_2 + 2n_2(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) + \omega_{21}^2(\varphi_2 - \varphi_1) + \omega_{02}^2\varphi_2 = -K_2 \ddot{\varphi}_1, \end{cases} \quad (3)$$

нов измельчения с учетом технологической нагрузки. Эти уравнения в принципе могут быть решены для стационарного случая аналитическим методом, но приводят к громоздким выражениям. В связи со сказанным более предпочтительным является численный метод решения, который позволяет, кроме прочего, проанализировать процессы установления колебаний. На

рисунке 3 показаны угловые перемещения рабочих органов  $\varphi_1 \equiv \varphi_1$  и  $\varphi_2 \equiv \varphi_2$ , а также угол их взаимных колебаний  $\psi = \varphi_2 - \varphi_1 \equiv \varphi_2 - \varphi_1$ . При этом использованы предполагаемые параметры процесса измельчения:  $\omega = 150\text{с}^{-1}$ ;  $\omega_{01} = 5,0$ ;  $\omega_{02} = 2,0$ ;  $\omega_{12} = 2,6$ ;  $\omega_{21} = 4,5$ ;  $n_1 = 0,67$ ;  $n_2 = 2,0$ ;  $K_1 = 0,033$   $K_2 = 0,500$ .

Компьютерные эксперименты в системе Mathcad [7] показали, что эффективным является режим работы измельчителя при осуществлении антирезонанса в системе. Этот режим в данной конструкции означает, что тяжелая корзина с прикрепленными вибровозбудителями (первый маятник, рис. 3а) совершает очень малые колебания, а пассивный элемент (маятник 2, рис. 3б) – наоборот, очень большие.



**Рис. 3. Угловые колебания (в радианах) активного  $\varphi_1$ , пассивного  $\varphi_2$  маятников и их взаимные угловые перемещения  $\psi = \varphi_2 - \varphi_1$  при антирезонансе**



Видно, что размахи внутреннего маятника примерно в 4-5 раз превышают размахи внешнего маятника. Для процесса дробления существенное значение имеет взаимное перемещение маятников. Оно достигает значения 0,2 рад. (рис. 3в) и может ограничиваться зазором между маятниками.

Для более полного изучения закономерностей антирезонанса в данной динамической системе построили амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) активного и пассивного маятников, а также их взаимных перемещений.

Для вычислительного эксперимента использовали прежнюю компьютерную модель, основанную на решении дифференциальных уравнений движения элементов измельчителя (уравнения 2 и 3).

В процессе эксперимента изменяли лишь частоту внешнего воздействия, остальные параметры оставались прежними, т. е. отыскивались функции

$$\varphi_1 = \varphi_1(\omega), \varphi_2 = \varphi_2(\omega), \psi = \varphi_2 - \varphi_1 = \psi(\omega).$$

Частота  $\omega$  принимала значения в промежутке 0-70 с<sup>-1</sup> через каждые 10 с<sup>-1</sup>. Полученные результаты были сначала представлены в виде полигонов распределения соответствующих угловых амплитуд колебаний в функции частоты (рис. 4).

В исследуемом диапазоне частот активный маятник имеет резонанс при его собственной частоте качаний  $\omega_{01} = 20$  и антирезонанс при

собственной частоте пассивного маятника  $\omega_{02} = 50$ . Как видно, режим резонанса является очень напряженным для активного маятника, поскольку раскачивать нужно массивное тело, содержащее вибровозбудители. При антирезонансе интенсивно раскачивается пассивный маятник, а активный маятник имеет минимальные колебания с амплитудой около 0,05 рад. Взаимные относительные колебания, от которых и зависит процесс измельчения, сохраняют большую величину 0,2 рад.

Таким образом, приходим к выводу, что в колебательной системе измельчителя необходимо поддерживать режим антирезонанса, поскольку он сокращает расход энергии на холостой ход измельчителя, уменьшает вибронгруженность узлов и деталей.

Для экспериментального подтверждения указанных выводов разработаны соответствующая методика и экспериментальное оборудование. Общий вид выполненного в металле измельчителя показан на рисунке 5. Здесь дополнительно показан загрузочный бункер, куда поступало исходное зерно.

Экспериментальные исследования проводили в лабораториях ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ. В процессе проведения этих исследований были использованы различные измерительные и регистрирующие приборы.

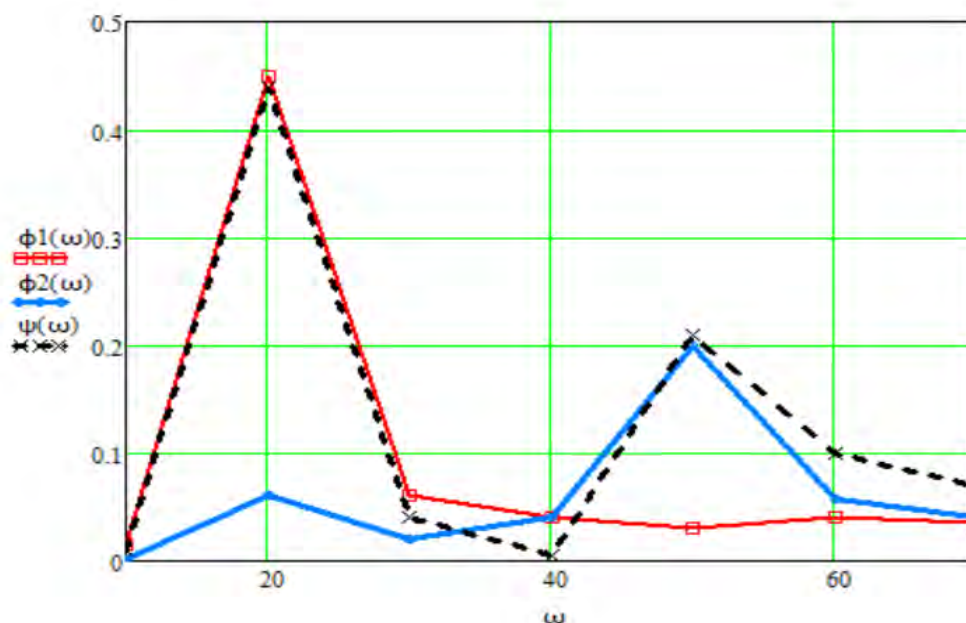


Рис. 4. Полигоны распределения амплитуд угловых колебаний (рад) активного  $\varphi_1$ , пассивного  $\varphi_2$  маятников и их взаимные угловые перемещения  $\psi = \varphi_2 - \varphi_1$  при антирезонансе



Рис. 5. Общий вид экспериментального вибрационного измельчителя

В первую очередь была снята экспериментальная АЧХ в виде экспериментальных точек (рис. 6). Теоретическая кривая представлена в виде сплошной кривой. В целом эксперимент подтвердил наличие в системе измельчителя как резонансов, так и антирезонанса. Расхождение между теорией и экспериментом не превышает 5-7% и только в зоне резонанса при  $\omega_{01} = 20$  составляет около 11%.

При вращении роторов в разные стороны должен устанавливаться нужный нам режим самосинхронизации, при котором возникают прямолинейные колебания корзины перпендикулярно длинным сторонам полостей измельчения (рис. 1).

Для экспериментального доказательства наличия указанного эффекта самосинхронизации были проведены некоторые опыты. При снятых крышках вибровозбудителей, когда обнажаются дебалансные валы с дебалансами, провели фото- и видеосъемку их взаимных положений в процессе вращения. Один из этих фотоснимков в качестве примера приведен на рисунке 7.

Установлено, что дебалансы при встречных направлениях вращения движутся синфазно с взаимным сдвигом фаз, составляющим примерно 0, по законам:

$$\varphi_{1д} = \omega t; \varphi_{2д} = -\omega t.$$

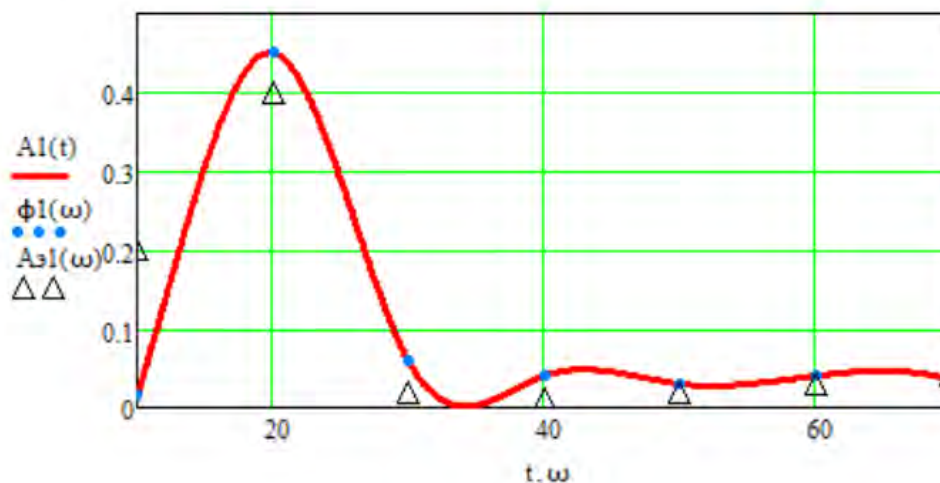


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) активного: сплошная линия – теория; точки – эксперимент



Рис. 7. Одно из положений дебалансов вировозбудителей во время синхронного вращения

Такой режим и предсказывался нами на основе имеющихся теоретических разработок [5].

При вращении дебалансов в противоположные стороны составляющие вынуждающей силы, направленные перпендикулярно линии дробления, будут складываться друг с другом, а направленные вдоль линии дробления – взаимно уничтожаться. Именно такой режим прямолинейных колебаний и нужен для осуществления процесса измельчения зерна в данной машине.

### Выводы

1. Получена математическая модель колебаний рабочих органов вибрационного измельчителя фуражного зерна, учитывающая его конструктивные особенности и взаимодействие рабочих органов с технологической средой.

2. Теоретически и экспериментально установлено, что в механической системе вибрационного измельчителя кормового зерна проявляются два динамических эффекта: антирезонанс двухмассной системы и самосинхронизация неуравновешенных роторов.

3. Испытания экспериментального образца измельчителя показали, что указанные эффекты полезны для технологического процесса, стабильны и сосуществуют вместе.

4. В целом эксперименты показывают работоспособность динамической схемы измельчителя с получением достаточных размахов колебаний рабочих органов. Вращения роторов вировозбудителей носят синхронно-синфазный характер, что положительно сказывается на функционировании измельчителя.

### Библиографический список

1. Патент №2688424(РФ). Измельчитель зернового материала / Федоренко И. Я., Левин А. М., Табаев А.В. – Заявл. 15.02.2018,

опубл.: 21.05.2019, Бюл. № 15. – Текст: непосредственный.

2. Федоренко, И. Я. Инновационные конструкции вибрационных дробилок фуражного зерна / И. Я. Федоренко, А. М. Левин, А. В. Табаев. – Текст: непосредственный // Главный агроном. – 2020. – № 5. – С. 63-67.

3. Федоренко, И. Я. Морфологический анализ вибрационных измельчителей кормового зерна / И. Я. Федоренко, А. М. Левин, А. В. Табаев. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2020. – № 1 (183). – С. 156-163.

4. Вайсберг, Л. А. Дробильно-измельчительное оборудование вибрационного действия для переработки сырья и промышленных отходов / Л. А. Вайсберг, А. Н. Сафронов. – Текст: непосредственный // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23, № 7. – С. 4-9.

5. Блехман, И. И. Теория вибрационных процессов и устройств / И. И. Блехман. – Санкт-Петербург: Руда и металлы, 2013. – 640 с. – Текст: непосредственный.

6. Fedorenko, I., Levin, A., Tabaev, A. (2019). Dynamic properties of vibration crusher of feed grain taking into account technological loading. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 341. 012115. 10.1088/1755-1315/341/1/012115.

7. Кирьянов, Д. В. Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0. / Д. В. Кирьянов. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с. – Текст: непосредственный.

### References

1. Pat. No. 2688424 (RF) Izmelchitel zernovogo materiala / I.Ia. Fedorenko, A.M. Levin, A.V. Tabaev; Zaiavl. 15.02.2018, opubl.: 21.05.2019, Biul. No. 15. Tekst: neposredstvennyi.



2. Fedorenko I.Ia. Innovatsionnye konstruksii vibratsionnykh drobilok furazhnogo zerna / I.Ia Fedorenko, A.M. Levin, A.V. Tabaev. – Tekst: neposredstvennyi // Glavnyi agronom. – 2020. – No. 5. – S. 63-67.

3. Fedorenko I.Ia. Morfologicheskii analiz vibratsionnykh izmelchitelei kormovogo zerna / I.Ia. Fedorenko, A.M. Levin., A.V. Tabaev. – Tekst: neposredstvennyi // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2020. – No. 1 (183). – S. 156-163.

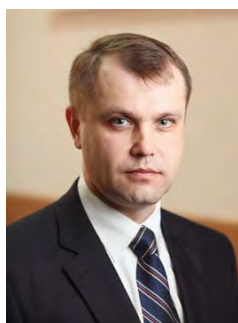
4. Vaisberg, L.A. Drobilno-izmelchitelnoe oborudovanie vibratsionnogo deistviia dlia pererabotki syria i promyshlennykh otkhodov / L.A. Vaisberg, A.N. Safronov. – Tekst: neposredstvennyi //

Ekologiya i promyshlennost Rossii. – 2019. – T. 23. – No. 7 – S. 4-9.

5. Blekhman I.I. Teoriia vibratsionnykh protsessov i ustroystv / I.I. Blekhman. – Sankt-Peterburg: Ruda i metally, 2013. – 640 s. – Tekst: neposredstvennyi.

6. Fedorenko, I., Levin, A., Tabaev, A. (2019). Dynamic properties of vibration crusher of feed grain taking into account technological loading. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 341. 012115. 10.1088/1755-1315/341/1/012115.

7. Kirianov D.V. Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0. / D.V. Kirianov. – Sankt-Peterburg: BKhV-Peterburg, 2012. – 432 s. – Tekst: neposredstvennyi.



УДК 631.354.2.076

DOI: 10.53083/1996-4277-2021-205-11-93-97

**А.А. Бричагина, С.Н. Ильин, В.В. Пальвинский,  
Н.В. Степанов, Д.Н. Пирожков**  
A.A. Brichagina, S.N. Ilin, V.V. Palvinskii,  
N.V. Stepanov, D.N. Pirozhkov

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОЙ ОЧИСТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

### AUTOMATIC CONTROL OF GRAIN COMBINE HARVESTER CLEANING OPERATION

**Ключевые слова:** уборка урожая, зерноуборочный комбайн, система очистки, качество зерновой смеси, потери за зерноуборочным комбайном

Технологическими показателями эффективности работы зерноуборочного комбайна являются качество получаемой зерновой смеси и количество потерь зерна. На данные показатели большое влияние оказывает человеческий фактор, который можно минимизировать за счет автоматизации управления работой очистки комбайна. Нами предложена схема такого устройства, включающая привод вентилятора от асинхронного электродвигателя с частотным преобразователем, сер-

воприводы для регулировки угла наклона планок верхних и нижних жалюзи, акустический датчик потерь зерна, позволяющий осуществлять обратную связь в системе управления и управляющий контроллер. В результате снизится влияние работы двигателя внутреннего сгорания комбайна на частоту вращения вала, уйдет необходимость использования электропривода постоянного тока или механического привода вентилятора, появится возможность автоматически регулировать угол наклона планок жалюзи с точностью до 0,1°, открывается возможность построения алгоритма управления системой очистки на основе нейронных сетей. Использование данного устройства позволит