

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-97-110>

Вибротранспортирующее устройство в составе автоматизированного сборочного комплекса

А.В. Мальчиков ¹ ✉, О.В. Емельянова ¹, Е.Н. Политов ¹, В.В. Марченко ¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: zveroknp@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Повышение эффективности проектирования вибротранспортирующих устройств в составе автоматизированного комплекса, за счет использования математической модели движения деталей под действием вибрации, настройка и верификация которой произведена в ходе натурных испытаний на лабораторном оборудовании.

Задачи. Разработка математической модели виброперемещения детали и постановка вычислительных экспериментов. Подготовка лабораторного стенда, постановка и проведения комплекса натурных экспериментов. Сравнительный анализ результатов экспериментов и оценка адекватности и применимости математической модели при проектировании вибротранспортирующих устройств.

Методы. Исследование выполнено в соответствии с общепринятыми методами проведения и планирования экспериментальных исследований. При моделировании движения деталей под действием вибрации использовалась нелинейная модель трения и оригинальный алгоритм интегрирования, позволяющий получить решение для разрабатываемой системы.

Результаты. В ходе работы была разработана математическая модель движения деталей по направляющим чаши вибробункера, отличающаяся возможностью задания горизонтальной и вертикальной составляющей вибрации и использующая нелинейную модель трения, позволяющая моделировать процессы при нулевой относительной скорости движения детали и чаши вибробункера. Выполнен комплекс натурных испытаний, доказавший адекватность разработанной модели.

Заключение. Предлагаемая в работе математическая модель перемещения деталей под действием двухкомпонентной вибрации, позволяет значительно повысить эффективность проектирования и настройки вибротранспортирующего устройства в составе сборочной автоматизированной линии, что может найти применения в широком диапазоне производственных задач.

Ключевые слова: математическая модель; вибропитатель; вибробункер; моделирование виброперемещений; натурные эксперименты; автоматизация производства.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет 2030».

Для цитирования: Вибротранспортирующее устройство в составе автоматизированного сборочного комплекса / А.В. Мальчиков, О.В. Емельянова, Е.Н. Политов, В.В. Марченко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(3): 97-110. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-97-110>.

Поступила в редакцию 26.08.2023

Подписана в печать 14.09.2023

Опубликована 28.10.2023

© Мальчиков А.В., Емельянова О.В., Политов Е.Н., Марченко В.В., 2023

Vibration Transporting Device as Part of an Automated Assembly Complex

Andrey V. Mal'chikov ¹ ✉, Oksana V. Emelyanova ¹,
Evgeniy N. Politov ¹, Viktor V. Marchenko ¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: zveroknnp@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Improving the efficiency of designing vibration-transporting devices as part of an automated complex, through the use of a mathematical model of the movement of parts under the influence of vibration, the adjustment and verification of which was carried out during field tests on laboratory equipment.

Tasks. Development of a mathematical model of vibration displacement and carried out computational experiments. Preparation of a laboratory stand, setting up and conducting a complex of field experiments. Comparative analysis of experimental results and assessment of the adequacy and applicability of the mathematical model in the design of vibration-transporting devices.

Methods. The study was carried out in accordance with generally accepted methods of conducting and planning experimental studies. When modeling the movement of parts under the influence of vibration, a nonlinear friction model and an original integration algorithm were used to obtain a solution for the system being developed.

Results. In the course of the work, a mathematical model of the movement of parts along the guides of the vibrobunker bowl was developed, characterized by the possibility of specifying the horizontal and vertical component of vibration and using a nonlinear friction model that allows modeling processes at zero relative speed of movement of the part and the bowl. A set of full-scale tests was performed, which proved the adequacy of the developed model.

Conclusion. The mathematical model proposed in the paper for moving parts under the action of two-component vibration can significantly improve the efficiency of designing and configuring a vibration-transporting device as part of an automated assembly line, which can find applications in a wide range of production tasks.

Keywords: mathematical model; vibration feeder; vibration bunker; vibration displacement modeling; field experiments; production automation.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The work was carried out within the framework of the implementation of the development program of the Southwest State University of the project "Priority 2030".

For citation: Mal'chikov A. V., Emelyanova O. V., Politov E.N., Marchenko V.V. Vibration Transporting Device as Part of an Automated Assembly Complex. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(3): 97-110 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-3-97-110>.

Received 26.08.2023

Accepted 14.09.2023

Published 28.10.2023

Введение

Одним из главных направлений развития современной науки и техники является широкое внедрение в различные отрасли промышленности средств механизации и автоматизации технологических процессов. Данные средства являются одним из основных условий роста производительности труда, снижения себестоимости изготовления продукции, а также улучшения её качества. Механизация и автоматизация производственных процессов в значительной степени повышает безопасность работы и улучшает условия труда рабочих [1-4].

Автоматизация процессов транспортировки и подачи деталей приобретает

большое значение при создании автоматических и полуавтоматических линий, т.к. надежная и экономичная конструкция загрузочного устройства, гарантирующая бесперебойную подачу правильно ориентированных в пространстве предметов обработки, во многом определяет качественные и количественные показатели всей линии.

В рамках работы рассматривается полуавтоматическая сборочная линия для электротехнических изделий, включающая машину контактной сварки, робот-манипулятор, вибропитатель и систему управления [5]. Схема производственной цепочки показана на рис. 1.

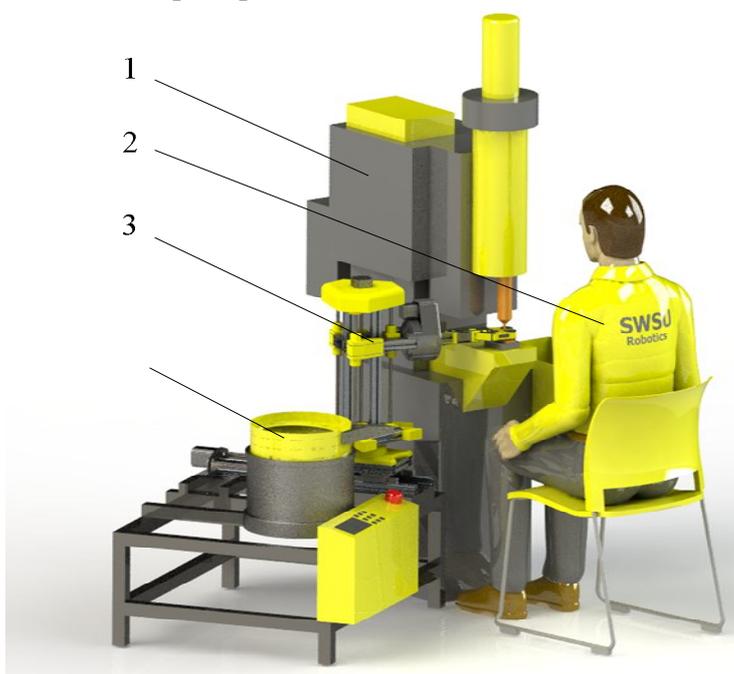


Рис. 1. Полуавтоматическая сборочная линия, оснащенная вибротранспортирующим устройством: **1** – машина контактной сварки; **2** – оператор-сборщик; **3** – робот-манипулятор; **4** – вибробункер

Fig. 1. Semi-automatic assembly line equipped with a vibration conveying device: **1** – contact welding machine; **2** – assembly operator; **3** – robotic arm; **4** – vibratory bowl feeder

Важнейшим этапом в процессе пуско-наладочных работ является настройка параметров питающего напряжения, отвечающего за характеристики вибрационного воздействия, для реализации требуемых параметров движения деталей. Одним из путей повышения эффективности оптимизации параметров вибрационного воздействия является математическое моделирование, которое связано с рядом принятых допущений, поэтому актуальной является задача верификации разрабатываемых моделей натурными экспериментами [6-7].

Материалы и методы

Для изучения влияния параметров вибрационного воздействия на перемещение транспортируемых деталей, была разработана математическая модель, где перемещаемая деталь представлена материальной частицей, движущейся по наклонной плоскости под действием силы, изменяющейся по гармоническому закону. Будем считать, что частица движется без отрыва от поверхности. Расчетная схема виброперемещения частицы представлена на рис. 2 [8, 9].

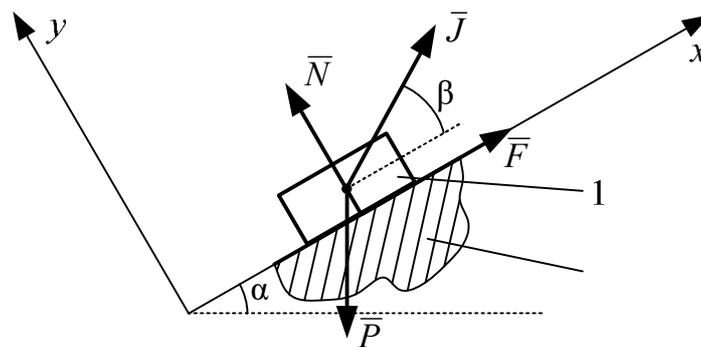


Рис. 2. Расчетная схема вибротранспортирования: 1 – перемещаемая деталь; 2 – направляющая чаши вибробункера

Fig. 2. Design scheme for vibrotransportation: 1 – movable detail; 2 – vibrobunker bowl guide

Материальная частица массой m находится на поверхности, расположенной под углом α к горизонту. На частицу действует сила тяжести \bar{P} , сила нормальной реакции опоры \bar{N} и сила трения \bar{F} . Движение частицы начинается в том случае, когда возмущающая сила \bar{J} , действующая под углом β к поверхности, превышает силу трения \bar{F} .

Дифференциальные уравнения относительного движения материальной

частицы в осях xOy , жёстко связанных с вибрирующей плоскостью, имеют вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mA\omega^2 \cos \beta \sin \omega t - mg \sin \alpha + F \\ m\ddot{y} = mA\omega^2 \sin \beta \sin \omega t - mg \cos \alpha + N. \end{cases} \quad (1)$$

При движении частицы по вибрирующей поверхности ($y \equiv 0$), силу сухого трения F определим следующим образом [10]:

$$F = \begin{cases} -fN \operatorname{sign}(\dot{x}) & \text{при } \dot{x} \neq 0 \\ -(\sum F) & \text{при } (\dot{x} = 0) \wedge (|\sum F| \leq fN) \\ -fN \operatorname{sign}(\sum F) & \text{при } (\dot{x} = 0) \wedge (|\sum F| > fN), \end{cases} \quad (2)$$

где $\sum F = mA\omega^2 \cos \beta \sin \omega t - mg \sin \alpha - m\ddot{x}$;
 A – амплитуда внешней силы; f – коэффициент трения скольжения, который может быть определен экспериментально [11-12], а нормальная реакция определяется из (1):

$$N = mg \cos \alpha - mA\omega^2 \sin \beta \sin \omega t. \quad (3)$$

С помощью программного пакета MATLAB была разработана программа, позволяющая получить численное решение системы дифференциальных уравнений и вывести результаты в виде

временных диаграмм при различных параметрах системы. В качестве примера математического моделирования рассмотрим движение частицы массой $m = 1$ г при перемещениях чаши вибр-робункера с амплитудами $A_x = 1.0$ мм, $A_y = 0.2$ мм и угловой частотой $\omega = 314.16$ рад/с (50 Гц). Угол наклона на-правляющей чаши вибробункера $\beta = 1.84^\circ$. Покажем результаты численного моделирования в виде временных диаграмм.

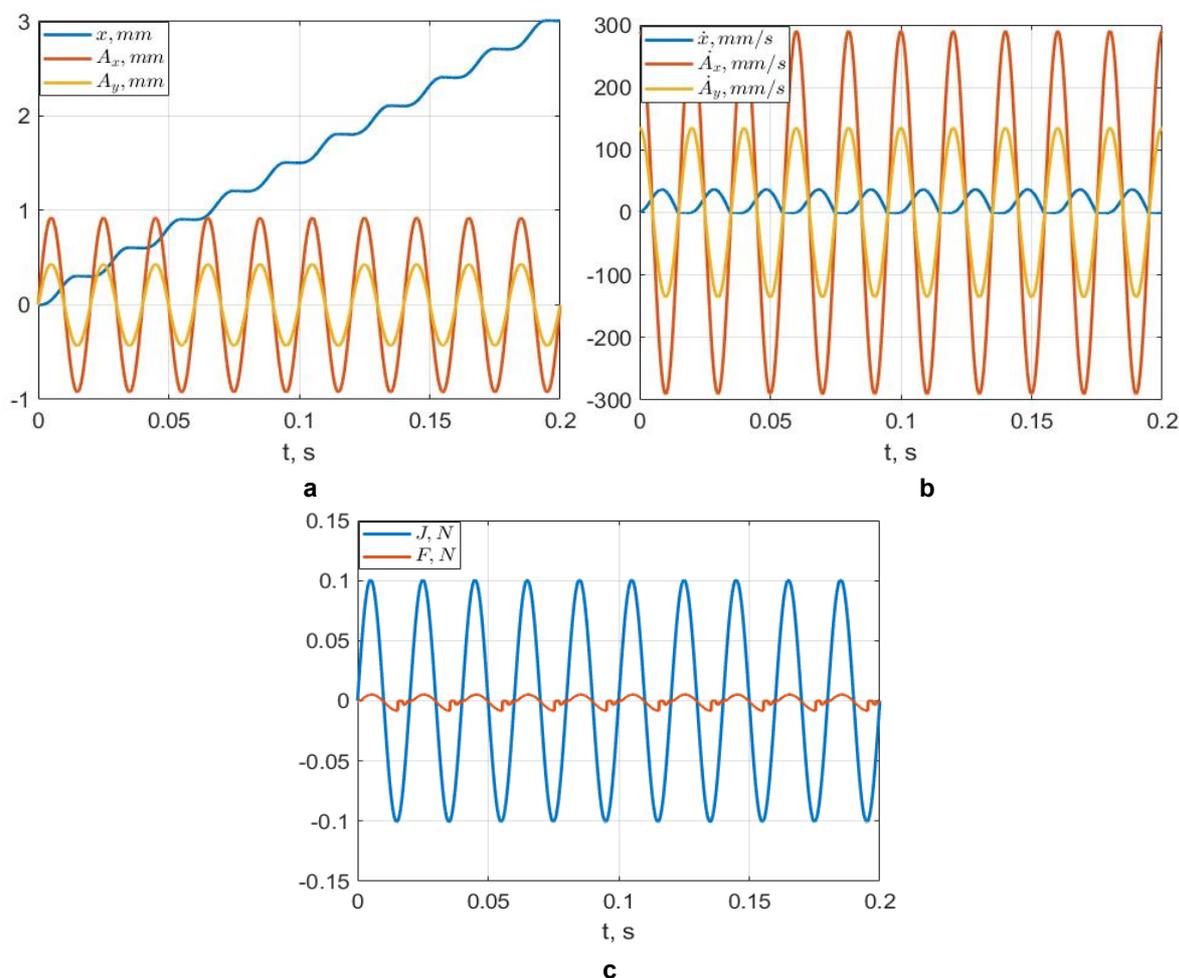


Рис. 3. Результаты численного моделирования в виде временных диаграмм: **а** – перемещения детали x , перемещения чаши A_x , A_y ; **б** – скорость перемещения детали \dot{x} , скорость чаши \dot{A}_x , \dot{A}_y ; **в** – силы J и F , действующие на деталь

Fig. 3. The results of numerical simulation in the form of time diagrams: **a** – the movement of the detail x , the movement of the bowl A_x , A_y ; **b** – the speed of the detail \dot{x} , the speed of the bowl \dot{A}_x , \dot{A}_y ; **c** – the forces J и F acting on the detail

Как видно из графика на рис. 3, а, частица за 0,2 секунды проходит расстояние около 3 мм, что дает скорость движения 15 мм/с, при этом максимальное значение внешней силы $J = 0,1$ Н при массе детали $m = 1$ г. Отметим, что при

заданных параметрах вибрации деталь практически не смещается назад. При увеличении суммарной амплитуды колебаний чаши наблюдается увеличение линейной скорости движения детали.

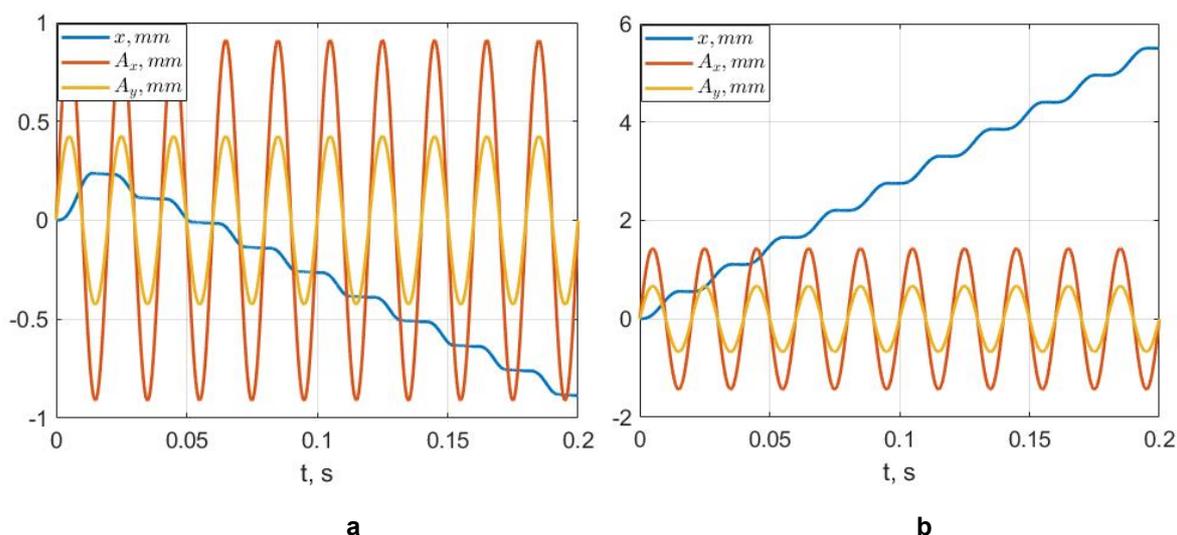


Рис. 4. Результаты моделирования движения детали: **а** – при $A_x = 1$ мм, $A_y = 0,1$ мм; **б** – при $A_x = 1,5$ мм, $A_y = 0,5$ мм

Fig. 4. Results of modeling: **a** – at $A_x = 1$ mm, $A_y = 0,1$ mm; **b** – at $A_x = 1,5$ mm, $A_y = 0,5$ mm

В результате моделирования при $A_x = 1$ мм и $A_y = 0,1$ мм (рис. 4, а) скорость движения отрицательная и составляет -4 мм/с, то есть детали проскальзывают вниз по направляющим чаши бункера под действием силы тяжести. Увеличение амплитуд до $A_x = 1,5$ мм, $A_y = 0,5$ мм (рис. 4, б), позволяет получить скорость порядка $27,5$ мм/с.

Полученная математическая модель позволяет установить скоростные параметры движения для деталей различной массы и при различных параметрах возмущающего воздействия, коэффици-

ентах трения и углах наклона направляющих чаши.

Результаты и их обсуждение

Для верификации полученных в процессе моделирования результатов был выполнен комплекс натурных испытаний на лабораторном оборудовании, включающем вибробункер, блок управления и измерительную систему, позволяющую оценивать как параметры вибрации, так и характеристики движения транспортируемых деталей.

Внешний вид и схема лабораторного стенда показаны на рис. 5.

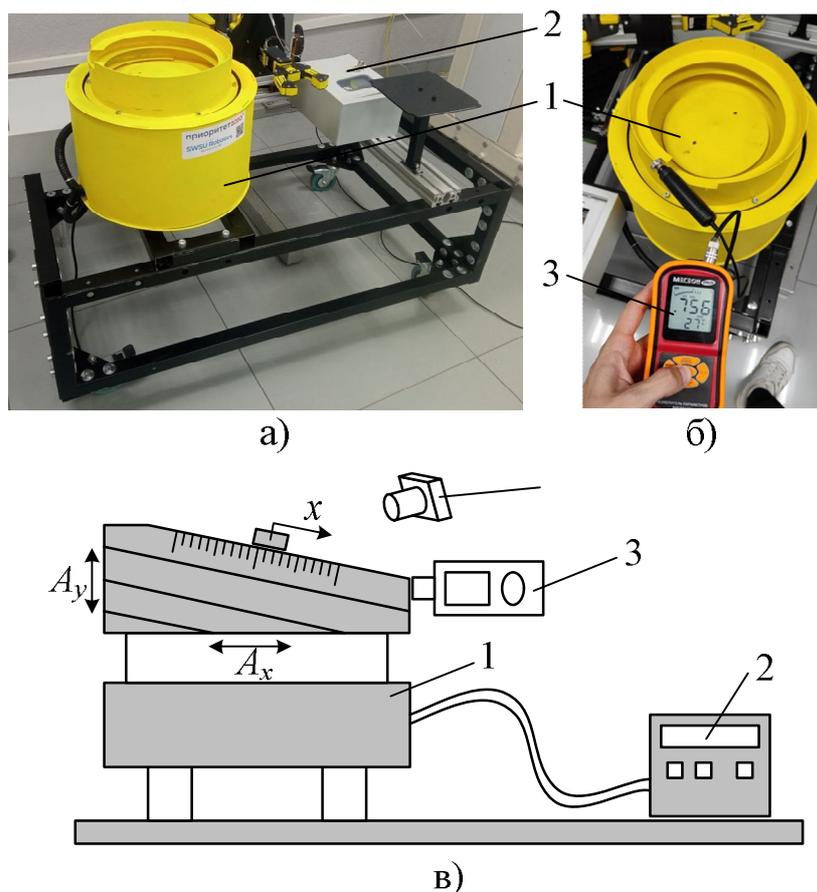


Рис. 5. Внешний вид станда (а), процесс измерения горизонтальной амплитуды виброперемещений (б), схема лабораторной установки (в): 1 – вибробункер; 2 – блок управления; 3 – виброметр МЕГЕОН 09631; 4 – видеокамера

Fig. 5. The appearance of the stand (a), the process of measuring the horizontal amplitude of vibration displacements (б); the scheme of the laboratory stand (в): 1 – vibratory bowl feeder; 2 – control unit; 3 – vibrometer MEGEON 09631; 4 – camcorder

Основу исследовательской установки составляет вибробункер (1), формирующий винтовое движение чаши, характеризующееся горизонтальной A_x , и вертикальной A_y , амплитудой, получающий двухфазное питание от блока управления. Питающие напряжения поступают с блока управления (2) на электромагниты, являющиеся частью электромеханической системы вибробункера, и формирующие винтовое движение чаши. Фаза и частота напряжений общая, а значения амплитуды сигналов

влияют на значения горизонтальной и вертикальной составляющих перемещений чаши. В процессе натурных экспериментов для оценки фактических значений виброперемещений использовался измеритель вибрации МЕГЕОН 09631 (3). Оценка скорости движения деталей по направляющим вибробункера производилась с применением нанесенной на чашу шкалы. Время перемещения определялось по видеофрагментам, снятым на видеокамеру (4).

В рамках экспериментальных испытаний на лабораторном стенде были также получены значения скорости детали при различных амплитудных значениях возмущающего воздействия, задаваемых путем изменения амплитуды питающего переменного напряжения. Во всех вычислительных и натурных экспериментах частота возмущающего воздействия была постоянной (50 Гц), также был неизменным угол наклона направляющей чаши вибробункера ($\beta = 1,84^\circ$).

Фактически вибробункер имеет достаточно сложную систему подвеса, с механическими ограничителями, нелинейными пружинами и т.д., поэтому настройка параметров виброперемещения осуществлялась путем подбора ам-

плитуды питающего напряжения на электромагнитах, отвечающих за горизонтальную амплитуду. При этом увеличение горизонтальной амплитуды приводило к снижению вертикальных перемещений чаши, что объясняется особенностью конструкции вибробункера.

В качестве перемещаемых деталей в экспериментах использовались шестигранные гайки (ГОСТ 5915-70) М8, М10 и М14. Скорость движения деталей оценивалась как отношение расстояния между метками на бункере ко времени перемещения между ними. В табл.1. показаны полученные значения скорости деталей в зависимости от параметров вибрации, полученные в ходе вычислительных и натурных экспериментов.

Таблица 1. Зависимости скорости детали от амплитуд вибрации

Table 1. The dependence component speed on vibration amplitudes

Масса детали $m = 5.55$ г (гайка М8) / Detail mass $m = 5.55$ g (M8 nut)					
A_x , мм / A_x , mm	A_y , мм / A_y , mm	Суммарная амплитуда, A / Total ampli- tude, A	\dot{x} мо- дель, мм/с / \dot{x} model, mm/s	\dot{x} стенд, мм/с/ \dot{x} model, mm/s	Относительная погрешность / Relative error
0.95	0.05	0,96	-50.5	-58.2	13%
0.9	0.2	0,92	35.3	28.6	23%
0.85	0.38	0,94	30.9	27.8	11%
0.8	0.49	0,94	27.1	23.8	14%
0.75	0.6	0,96	21.6	20.1	7%
Масса детали $m = 10.2$ г (гайка М10) / Detail mass $m = 10.2$ g (M10 nut)					
0.95	0.05	0,96	-50.5	-48.7	3%
0.9	0.2	0,92	35.3	40.0	11%
0.85	0.38	0,94	30.9	34.5	10%
0.8	0.49	0,94	27.1	28.6	5%
0.75	0.6	0,96	21.6	24.5	12%

Окончание табл. 2 / Table 2 (ending)

A_x , мм / A_x , mm	A_y , мм / A_y , mm	Суммарная амплитуда, А/ Total ampli- tude, A	\dot{x} мо- дель, мм/с / \dot{x} model, mm/s	\dot{x} стенд, мм/с/ \dot{x} model, mm/s	Относительная погрешность / Relative error
Масса детали $m = 37.6$ г (гайка М14) / Detail mass $m = 37.6$ g (M14 nut)					
0.95	0.05	0,96	-50.5	-51.2	1%
0.9	0.2	0,92	35.3	32.3	9%
0.85	0.38	0,94	30.9	27.0	14%
0.8	0.49	0,94	27.1	23.8	14%
0.75	0.6	0,96	21.6	19.1	13%

Как можно видеть из табл. 1. экспериментально полученные значения скоростей имеют значительный разброс для разных масс деталей. Некоторые значения отличаются почти в два раза, хотя из математической модели, очевидно, что скорость движения деталей не должна зависеть от массы. Такой эффект объясняется в том числе неоднородностью поверхности направляющих чаши бункера, не обеспечением безотрывного движения деталей, малым количеством отдельных экспериментов и в меньшей степени погрешностью измерений, как амплитуд, так и скоростей движения деталей. Сравнение средних значений скоростей перемещения деталей разной массы с результатами математического моделирования показало, что максимальная относительная ошибка составит 4,9%, при этом средняя ошибка по всем экспериментам составит 2,2%. Модель адекватно описывает процесс движения частиц вниз по чаше, при низких значениях вертикальной ампли-

туды, а характер зависимостей скорости от вертикальной и горизонтальной амплитуды отражены корректно.

Выводы

В результате исследований была разработана математическая модель движения частицы по направляющим чаши бункера под действием вибрации. Для апробации модели был выполнен комплекс натуральных испытаний на исследовательском стенде, включающем вибропитатель, блок управления и измерительную систему. В ходе численного моделирования виброперемещения деталей с параметрами возмущающего воздействия, определенных в ходе экспериментов, были установлены допустимые скорости движения деталей для различных режимов работы. Сравнительный анализ результатов вычислительных и натуральных экспериментов показал качественную сходимость и среднюю погрешность 2.2%. Таким образом, разработанная в рамках исследования математическая

модель вибротранспортирования деталей
может быть использована при проекти-

ровании и настройке вибропитателей в
составе автоматизированных линий.

Список литературы

1. Автоматизация технологической подготовки производства профильных валов / С. Г. Емельянов, А. О. Гладышкин, М. С. Разумов, С. Ф. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №. 1-1. С. 164-168.
2. Преображенский Ю. П. Некоторые проблемы автоматизации процессов // Техника и технологии: пути инновационного развития. Курск, 2019. С. 62-64.
3. Modeling of human-machine interaction in an industrial exoskeleton control system / S. Jatsun, A. Malchikov, O. Loktionova, A. Yatsun // Interactive Collaborative Robotics: 5th International Conference, ICR 2020, St Petersburg, Russia, October 7-9, 2020, Proceedings 5. Springer International Publishing, 2020. P. 116-125.
4. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Automatization of manual labor by using an industrial exoskeleton // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2020. P. 470-475.
5. Яцун С.Ф., Мальчиков А.В., Кочергин О.Б. Метод определения ориентации контакт-детали при автоматизации технологического процесса пайки // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(3): 8-20. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-8-20>.
6. Локтионова О. Г. Синтез оптимальных параметров вибрационного транспортирующего устройства сыпучих материалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2006. №. 9. С. 46-50.
7. Афанасьев А. и др. Определение рациональных параметров линейного электромагнитного двигателя для вибропитателя-грохота // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2015. №. 8. С. 81-89.
8. Общие положения по работе ВБЗУ. URL: <https://studfile.net/preview/6219169/page:5/>
9. Сельвинский В. В. Вибрационное перемещение в процессах транспортирования // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2016. №. 75. С. 10-15.
10. Лушников Б. В. Компьютерное моделирование динамики элемента сухого некулонова трения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. №. 1-2. С. 439-444.
11. Лушников Б. В. Испытательный стенд для идентификации динамических параметров сухого некулонова трения // Фундаментальные исследования. 2012. №. 3-3. С. 638-641.

12. А.с. 1527559, МКИ G01N 19/02, А1. Способ определения силы сухого трения и коэффициента вязкого трения в колебательной системе / С. Л. Цыфанский, Б. В. Лушников, М. А. Магоне. (СССР). №4406068/25-28 ; заявлено 07.04.88 ; опубл. 07.12.89, Бюл. № 45. 3 с.

13. Патент на полезную модель RU 44014 U1, Электромагнитный двигатель / Рукавицын А.Н., № 2004128139/22 ; заявлено 21.09.2004 ; опубл. 10.02.2005, Бюл. № 4. 4 с.

14. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Investigation of the mechatronic system oscillatory motion with discrete feedback PD-control //Vibroengineering Procedia. 2016. Vol. 8. P. 225-230.

15. Богуславский Э. И., Усыпко А. С. Оптимизация области применения и организации работы доставочного оборудования в условиях Расвумчоррского рудника ОАО «Апатит» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2004. №. 12. С. 188-191.

16. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Adaptive Control System for DC Electric Drive under Uncertainty // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2020. P. 1-5.

17. Control features of the electromechanical system with end-effector considering the regulated torque / A. Malchikov, A. Yatsun, P. Bezmen, O. Tarasov // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017. Vol. 113. P. 02001.

18. Лупехина И. В., Безмен П. А., Яцун С. Ф. Плоскопараллельное движение вибрационного робота по горизонтальной шероховатой поверхности // Естественные и технические науки. 2012. №. 4. С. 41-44.

19. Безмен П. А., Яцун С. Ф. Исследование движения вибрационного мобильного робота с электромеханическим приводом внутренней подвижной массы // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2009. №. 2. С. 49-61.

20. Дырда В. И. и др. Динамика вибропитателей с нелинейной упругой характеристикой // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2017. №. 2 (68). С. 131-139.

References

1. Emelyanov, S.G., Gladyshevskiy, A.O., Razumov, M.S., Jatsun, S.F. Automation Technological Preparation of Manufacture Profile Shaft. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 1-1, pp. 164-168.

2. Preobrazhensky Yu. P. [Some problems of process automation]. *Tekhnika i tekhnologii: puti innovatsionnogo razvitiya* [Technology and technology: ways of innovative development]. Kursk, 2019, pp. 62-64 (In Russ.).

3. Jatsun S., Malchikov A., Loktionova O., Yatsun A. Modeling of human-machine interaction in an industrial exoskeleton control system. *Interactive Collaborative Robotics: 5th International Conference, ICR 2020, Proceedings 5*. Springer International Publishing, St. Petersburg 2020. pp. 116-125.

4. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Automatization of manual labor by using an industrial exoskeleton. *2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. IEEE, 2020. pp. 470-475.

5. Yatsun S. F., Mal'chikov A. V., Kochergin O.B. Method for Orientation Determining of the Detail for the Automated Soldering Technological Process. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(3): 8-20 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-8-20>.

6. Loktionova O.G. Sintez optimal'nykh parametrov vibratsionnogo transportiruyushchego ustroystva sypuchikh materialov [Synthesis of optimal parameters of a vibrating conveying device of bulk materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = News of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering*. 2006. no. 9, pp. 46-50.

7. Afanasyev A. et al. Opredelenie ratsional'nykh parametrov lineinogo elektromagnitnogo dvigatelya dlya vibropitatatelya-grokhota [Determination of rational parameters of a linear electromagnetic motor for a vibrating screen feeder]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of Higher Educational Institutions. Mining Magazine*, 2015, no. 8, pp. 81-89.

8. Obshchie polozheniya po rabote VBZU [General provisions on the work of the VBZU]. Available at: <https://studfile.net/preview/6219169/page:5/>.

9. Selvinsky V.V. Vibratsionnoe peremeshchenie v protsessakh transportirovaniya [Vibrational displacement in transportation processes]. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i ekonomicheskie nauki = Bulletin of the Amur State University. Series: Natural and Economic Sciences*, 2016, no. 75, pp. 10-15.

10. Lushnikov B.V. Komp'yuternoe modelirovanie dinamiki elementa sukhogo nekulonova treniya [Computer simulation of dynamics of dry non-coulomb friction element]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2010, vol. 12, no. 1-2, pp. 439-444.

11. Lushnikov B.V. Ispytatel'nyi stend dlya identifikatsii dinamicheskikh parametrov sukhogo nekulonova treniya [Test bench for identification of dynamic parameters of dry non-coulomb friction]. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2012, no. 3-3, pp. 638-641.

12. A.s. 1527559, MKI G01N 19/02, A1. *Sposob opredeleniya sily sukhogo treniya i koeffitsienta vyazkogo treniya v kolebatel'noi sisteme* [Method for determining the force of

dry friction and the coefficient of viscous friction in an oscillatory system]. S. L. Tsyfansky, B. V. Lushnikov, M. A. Magone. (THE USSR). No. 4406068/25-28; declared 04/07/88; publ. 07.12.89, Bulletin. No. 45. 3 p.

13. Patent RU 44014 U1, Elektromagnitnyi dvigatel' [Electromagnetic motor]. Rukavitsyn A.N. No: 2004128139/22; declared 09/21/2004; publ. 02/10/2005, Bulletin. No. 4. 4 p.

14. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Investigation of the mechatronic system oscillatory motion with discrete feedback PD-control. *Vibroengineering Procedia*, 2016, vol. 8, pp. 225-230.

15. Boguslavsky E. I., Usypko A. S. Optimizatsiya oblasti primeneniya i organizatsii raboty dostavochnogo oborudovaniya v usloviyakh Rasvumchorrskogo rudnika OAO «Apatit» [Optimization of the scope and organization of operation of delivery equipment in the conditions of the Rasvumchorrsky mine of OJSC Apatit]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2004, no. 12, pp. 188-191.

16. Jatsun S., Malchikov A., Yatsun A. Adaptive Control System for DC Electric Drive under Uncertainty // *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. IEEE, 2020, C. 1-5.

17. Malchikov A., Yatsun A., Bezmen P., Tarasov O. Control features of the electromechanical system with end-effector considering the regulated torque. *MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences*, 2017, vol. 113, 02001 p.

18. Lupekhina I.V., Bezmen P.A., Yatsun S.F. Ploskoparallel'noe dvizhenie vibratsionnogo robota po gorizontal'noi sherokhovatoi poverkhnosti [Plane-parallel motion of a vibrating robot on a horizontal rough surface]. *Estestvennyye i tekhnicheskie nauki = Natural and Technical Sciences*, 2012, no. 4, pp. 41-44.

19. Bezmen P. A., Yatsun S. F. Issledovanie dvizheniya vibratsionnogo mobil'nogo robota s elektromekhanicheskim privodom vnutrennei podvizhnoi massy [Investigation of the motion of a vibrating mobile robot with an electromechanical drive of an internal moving mass] . *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii = Izvestia of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering. Mashinostroenie*, 2009, no. 2, pp. 49-61.

20. Dyrda V.I. et al. Dinamika vibropitatelei s nelineinoi uprugoi kharakteristikoi [Dynamics of vibratory feeders with nonlinear elastic characteristics]. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta = Science and Progress of Transport. Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport*, 2017, no. 2 (68) pp. 131-139.

Информация об авторах / Information about the Authors

Мальчиков Андрей Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zveroknp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>, ResearcherID N-8856-2016

Andrey V. Mal'chikov, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zveroknp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>, ResearcherID N-8856-2016

Емельянова Оксана Викторовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: oks-emelyanova@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6067-3114>

Oksana V. Emelyanova, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zveroknp@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2902-1721>

Политов Евгений Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: politovyevgeny@rambler.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0597-8505>

Evgeniy N. Politov, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: 5-storm-7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0597-8505>

Марченко Виктор Васильевич, магистрант кафедры механики мехатроники и робототехники Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vick.mar4encko2017@yandex.ru

Viktor V. Marchenko, Master Student, Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vick.mar4encko2017@yandex.ru