

УДК 621.313.126-83-868-52(045)

РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ДЕБАЛАНСНОГО ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯ

В. В. Осадчий, И. В. Батраченко, Д. В. Мыкытюк

Запорожский национальный технический университет

ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина. E-mail: w.osadchiy@gmail.com

Исследование посвящено проблеме снижения материалоемкости и повышения производительности вибрационного технологического оборудования путем создания регулируемых электроприводов дебалансного вибровозбудителя, обеспечивающих заданное взаимное расположение вращающихся дебалансов. Предложена структура системы управления четырехдвигательным дебалансным вибровозбудителем. Приведена математическая модель двухдвигательного вибровозбудителя. Создан лабораторный стенд для исследования совместной работы электрических дебалансных вибраторов.

Ключевые слова: вибропривод, дебаланс, синхронизация, вибрационное поддержание вращения, акселерометр.

РЕГУЛЬОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ДЕБАЛАНСНОГО ВІБРОЗБУДЖУВАЧА

В. В. Осадчий, І. В. Батраченко, Д. В. Микитюк

Запорізький національний технічний університет

вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна. E-mail: w.osadchiy@gmail.com

Дослідження присвячено проблемі зниження матеріаломісткості та підвищення продуктивності вібраційного технологічного обладнання шляхом створення регульованих електроприводів дебалансного вібровозбудувача, що забезпечують задане взаємне розташування дебалансів, що обертаються. Запропоновано структуру системи керування чотиридвигуновим дебалансним вібровозбудувачем. Наведено математичну модель дводвигунового дебалансного вібровозбудувача. Створено лабораторний стенд для дослідження спільної роботи електричних дебалансних вібраторів.

Ключові слова: вібропривід, дебаланс, синхронізація, вібраційне підтримання обертання, акселерометр.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Вибротехнологии применяются в различных отраслях промышленности. В частности, в технологических операциях дозирования широко распространены вибрационные питатели [1, 2]. Регулирование амплитуды вибротолка в совокупности с адаптивными алгоритмами управления позволяет повысить быстродействие процесса дозирования, не потеряв при этом точности [3]. Наиболее подходящими, с точки зрения регулирования возмущающей силы, а в конечном итоге – производительности вибропитателя, являются электромагнитные вибраторы, однако в диапазоне генерируемых возмущающих сил 7...30 кН они существенно уступают электрическим дебалансным вибраторам (в среднем 10,1 кг/кН у электромагнитных против 2,2 кг/кН у дебалансных) [4]. С учетом сказанного, создание регулируемых электроприводов дебалансного вибровозбудителя является актуальной задачей.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Амплитуда возмущающей силы выпускаемых серийно дебалансных вибраторов может быть установлена от нуля до максимального значения путем изменения взаимного положения дебалансов от 180 до 0°. Существенным недостатком такого регулирования является невозможность проведения данной операции в процессе работы. Известны различные идеи механизмов, основанные на изменении расстояния от центра масс дебаланса (или группы дебалансов) до оси вращения [5, 6], но только единицы реализованы практически [7], и, по имеющимся данным, ни один не выпускается серийно. Возможными причинами отсутствия серийных образцов, по мнению авторов, являются сложность изготовления, высокая стоимость и быстрый износ, обусловленный периодичностью и знакопеременностью сило-

вых воздействий на элементы механизмов.

Принцип действия предлагаемого регулируемого дебалансного вибратора состоит в том, что каждый из двух дебалансов приводится в движение отдельным электродвигателем. Варианты взаимного расположения дебалансов показаны на рис. 1, где обозначено: O – ось вращения; m – масса дебаланса; ω – угловая скорость вращения; α – угол, определяющий взаимное расположение дебалансов; F – возмущающая сила; F_{\max} – максимальное значение возмущающей силы.

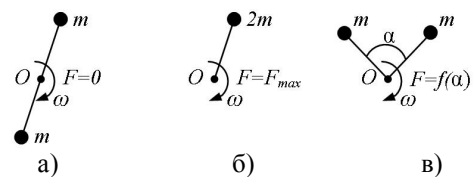


Рисунок 1 – Регулирование возмущающей силы

В первом случае (рис. 1,а) дебалансы вращаются в противофазе и возмущающая сила равна нулю. Во втором (рис. 1,б) – дебалансы вращаются синфазно и возмущающая сила максимальна. В третьем случае (рис. 1,в) возмущающая сила определяется выражением:

$$F = F_{\max} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad \alpha \in [0, \pi]. \quad (1)$$

Нетрудно заметить, что варианты на рис. 1,а,б являются частными случаями варианта 1,в.

Для вибрационных питателей необходима переменная возмущающая сила, действующая вдоль одной оси, что достигается парным включением дебалансных вибраторов, роторы которых вращаются в противоположных направлениях [1, 2]. Необходи-

мое в данном случае взаимное расположение дебалансов обеспечивается явлением самосинхронизации, которое подробно описано в [8].

Применение двух пар дебалансных вибраторов позволяет, меняя взаимное угловое положение одной пары относительно другой, регулировать амплитуду возмущающей силы [9–12].

Рассмотрим систему, состоящую из четырех дебалансных виброприводов (рис. 2). Для простоты изложения будем считать, что массы m и эксцентриситеты ε всех дебалансов одинаковы, а их оси вращения $O_1 - O_4$ расположены симметрично началу координат O .

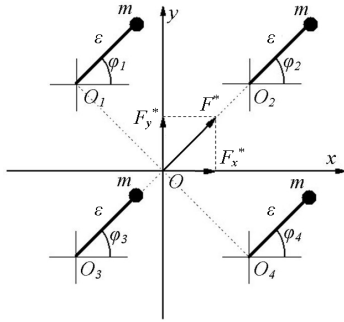


Рисунок 2 – Четырёхдебалансный вибровозбудитель

Проекции нормированной возмущающей силы F^* определяются выражениями:

$$\begin{cases} F_x^* = \cos \varphi_1 + \cos \varphi_2 + \cos \varphi_3 + \cos \varphi_4; \\ F_y^* = \sin \varphi_1 + \sin \varphi_2 + \sin \varphi_3 + \sin \varphi_4. \end{cases} \quad (2)$$

Управляя движением дебалансов в соответствии со следующими зависимостями:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \omega t + \beta + \gamma; \\ \varphi_2 = \omega t - \beta + \gamma + \pi; \\ \varphi_3 = -\omega t - \beta; \\ \varphi_4 = -\omega t + \beta + \pi, \end{cases} \quad (3)$$

где ω – угловая частота вращения дебалансов; β и γ – варьируемые параметры, определяющие взаимное расположение дебалансов, получим:

$$\begin{cases} F_x^* = 4 \sin \beta \cos \frac{\gamma}{2} \sin \left(\omega t + \frac{\gamma}{2} + \pi \right); \\ F_y^* = 4 \sin \beta \sin \frac{\gamma}{2} \sin \left(\omega t + \frac{\gamma}{2} + \pi \right). \end{cases} \quad (4)$$

Как видим, параметр β определяет амплитуду возмущающей силы, а параметр γ – её направление.

Таким образом, управляя угловыми положениями электроприводов четырёх дебалансов в соответствии с зависимостями (3), можно отдельно управлять частотой, амплитудой и направлением вибрации. Функциональная схема четырехдебалансного вибровозбудителя приведена на рис. 3, где обозначено: f, A_a, Θ – заданные частота, амплитуда и направление вибрации; $M_1 \dots M_4$ – момент двигателя; $ДВ_1 \dots ДВ_4$ – дебалансный вибратор; PS – акселерометр (датчик ускорения); $\varphi_1 \dots \varphi_4$ – угол поворота дебаланса; \bar{a} – ускорение дебалансного вибровозбудителя.

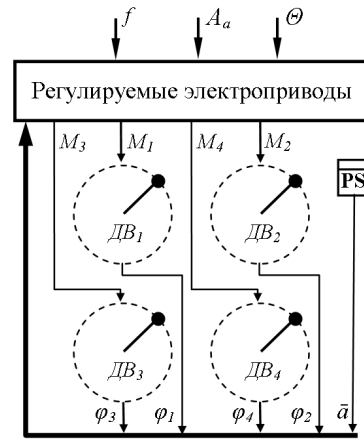


Рисунок 3 – Функциональная схема вибровозбудителя

Следует отметить, что все дебалансные вибраторы $ДВ_1 - ДВ_4$ расположены на общей платформе, которая движется с переменным ускорением. В результате этого появляются дополнительные моменты относительно осей вращения дебалансов [8], и кажущаяся, на первый взгляд, система независимых виброприводов при более детальном рассмотрении оказывается взаимосвязанной и существенно нелинейной.

Начальные исследования по созданию взаимосвязанных дебалансных виброприводов проводились для случая $\beta = var$ и $\gamma = 0$, т.е. регулирование только амплитуды возмущающей силы, в соответствии с чем разработан лабораторный стенд (рис. 4), состоящий из подвижной платформы с установленными на ней двигателями от CD-ROM (M) и акселерометром (PS), блоков питания ($БП$), вольтметров и амперметров.

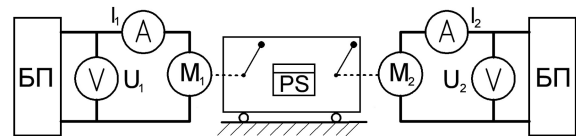


Рисунок 4 – Функциональная схема лабораторного стенда

При этом учитываем, что при $\gamma = 0$ $\varphi_3 = -\varphi_1$, а $\varphi_4 = -\varphi_2$ проекции возмущающей силы (2) определяются выражениями:

$$\begin{cases} F_x^* = 2 \cos \varphi_1 + 2 \cos \varphi_2; \\ F_y^* = 0, \end{cases} \quad (5)$$

количество дебалансов уменьшено до двух, а количество степеней свободы подвижной платформы – до одной.

Внешний вид стенда приведен на рис. 5. В качестве дебаланса использован mini-CD с закрепленным на нем болтом М4. Регулируемый упругий элемент состоит из двух металлических линеек, зажатых в струбцине.

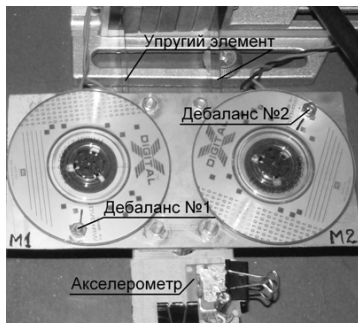


Рисунок 5 – Фото лабораторного станда

С учетом вибрационного вращательного момента, возникающего при колебании оси неуравновешенного тела [8], двухдвигательный однокоординатный вибровозбудитель может быть описан следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_{pl}\ddot{x} = -k_x\dot{x} - C_x x + F_{1x} + F_{2x}; \\ F_{1x} = m_{deb}\varepsilon\dot{\phi}_1^2 \cos \phi_1; \\ F_{2x} = m_{deb}\varepsilon\dot{\phi}_2^2 \cos \phi_2; \\ J_c\dot{\phi}_1 = KI_1 - T_e\dot{\phi}_1 + m_{deb}\varepsilon\ddot{x} \sin \phi_1; \\ J_c\dot{\phi}_2 = KI_2 - T_e\dot{\phi}_2 + m_{deb}\varepsilon\ddot{x} \sin \phi_2; \\ I_1 = \frac{1}{R}(U_1 - K\dot{\phi}_1); \\ I_2 = \frac{1}{R}(U_2 - K\dot{\phi}_2), \end{cases} \quad (6)$$

где m_{pl} – масса платформы (248 г); x – смещение платформы от положения, соответствующего ненапряженным упругим элементам; k_x – коэффициент вязкого трения при движении платформы (2,457 Нм/с); C_x – жесткость упругих элементов (5173 Н/м); F_x – возмущающая сила, действующая со стороны дебаланса на подвижную платформу; m_{deb} – масса дебаланса (9,2 г); ε – эксцентриситет (7,3 мм); ϕ – угол поворота дебаланса относительно положительного направления оси x ; J_c – приведенный момент инерции дебаланса ($8,489 \cdot 10^{-6}$ кг·м²); K – конструктивный коэффициент двигателя ($577 \cdot 10^{-3}$ В·с); I – ток двигателя; T_e – коэффициент вязкого трения при вращении дебаланса ($9,36 \cdot 10^{-7}$ Н·м·с); R – сопротивление якорной цепи (8,0 Ом); U – напряжение питания двигателя. В скобках указаны измеренные значения или значения, полученные экспериментальным путем.

С целью подтверждения адекватности имитационной модели проведены идентичные, по сути, математический и физический эксперименты. Для находящихся в режиме синхронизма двух дебалансных виброприводов при варьировании напряжения питания U_2 фиксировались токи I_1 , I_2 , а также разность углов поворота дебалансов (при этом напряжение U_1 составляло 2,7 В). Зависимости токов двигателей от напряжения двигателя M_2 приведены на рис. 6, где 1 и 2 – ток I_1 , 3 и 4 – ток I_2 , причем 1 и 3 соответствуют физическому эксперименту, а 2 и 4 – математическому.

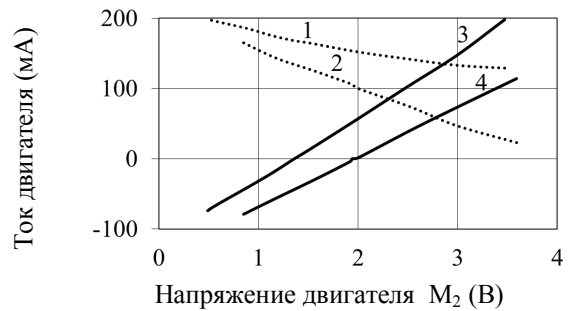


Рисунок 6 – Электрические характеристики

Анализ зависимостей токов от напряжения U_2 показал, что математическая модель отражает качественную картину взаимосвязей, обусловленных процессами передачи энергии между дебалансными вибродвигателями и платформой. Количественное несовпадение указанных зависимостей наиболее вероятно связано с допущениями о постоянстве коэффициента упругости и прямолинейном движении платформы вдоль одной оси, а также неучтенными электрическими и механическими потерями.

Зависимость разности углов поворота дебалансов от напряжения двигателя M_2 приведены на рис. 7, где кривая 1 соответствует физическому эксперименту, кривая 2 – математическому.

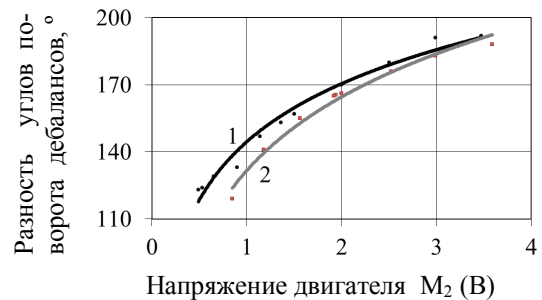


Рисунок 7 – Электромеханические характеристики

Следует отметить, что снижение напряжения U_2 ниже определенного порога приводило к выходу из режима синхронного вращения дебалансов.

ВЫВОДЫ. Управляя угловыми положениями электроприводов четырёх дебалансов в соответствии с зависимостями (3), можно отдельно управлять частотой, амплитудой и направлением вибрации.

Адекватное отражение имитационной моделью качественных зависимостей основных электрических и механических координат исследуемой системы дает основания для использования полученной модели при разработке системы управления многодвигательным дебалансным виброприводом, обеспечивающей независимое регулирование частоты, направления и амплитуды вибрации.

Полученный путем снижения напряжения питания второго двигателя диапазон регулирования разности углов поворота дебалансов (от 180 до 120 °) составляет только треть от желаемого, следовательно, необходимы дальнейшие исследования в направлении установления условий синхронного вращения дебалансов за пределами указанного диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потураев В.Н., Франчук В.П., Червоненко А.Г. Вибрационные транспортирующие машины. – М.: Машиностроение, 1964. – 272 с.
2. Спиваковский А.О., Гончаревич Н.Ф. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства. – М.: Машиностроение, 1972. – 328 с.
3. Осадчий В.В. Повышение быстродействия электромеханической системы многокомпонентного весового дозирования // Научно-прикладный журнал "Технічна електродинаміка". – К.: Інститут електродинаміки НАН України. – 2010. – Вип. 4. – С. 48–53.
4. Каталог продукции фирмы JVM [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.jvm.com/unwuchtmotoren.php?LAId=2>
5. Чубик Р.В., Ярошенко Л.В. Керовані вібраційні технологічні машини. – Вінниця: ВНАУ, 2011. – 355 с.
6. Патент України 89106 МПК В01 В06В 1/10. Вібробуджувач / Ємельяненко М.Г., Удовіченко Р.В.; заявл. 02.04.2008, опубл. 25.12.2009, Бюл. № 24.
7. Сердюк Л.И. Основы теории, расчет и конструирование управляемых вибрационных машин с дебалансными возбудителями: автореф. дис. докт. техн. наук / Л.И. Сердюк; ХПИ. – Харьков, 1991. – 48 с.
8. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. – М.: Наука, 1971. – 894 с.
9. Патент СССР 1177142 В06В 1/16. Двухвальный вибратор / Германов А.П.; заявл. 22.07.1976, опубл. 07.09.1985, Бюл. № 33.
10. United States Patent 5903077. Modular vibratory force generator, and method of operating same / Garnjost K.D., Rey G.J.; stated 19.02.1998, publ. 11.05.1999.
11. United States Patent 6105685. Adjusting device for and unbalance vibrator with adjustable centrifugal moment / Bald H.B.; stated 22.06.1998, publ. 22.08.2000.
12. United States Patent 7582032. Anti-vibratory device with rotary compensation weights / Manfredotti T.C., Sequera D.N.; stated 17.01.2006, publ. 1.09.2009.

ADJUSTABLE ELECTRIC DRIVE OF UNBALANCED VIBRO-EXCITER

W. Osadchiy, I. Batrachenko, D. Mykytyuk

Zaporizhzhya National Technical University

ul. Zhukovskogo, 64, Zaporozhye, 69063, Ukraine. E-mail: w.osadchiy@gmail.com

Work is devoted to a problem of decreasing material capacity and increasing productivity of vibrating processing equipment through the synthesis of a control system by the adjustable the electric drive of unbalanced exciter, providing a specified relative position of the rotating unbalance. Proposed a structure for the control system four-engined unbalanced vibro-exciter. A mathematical model of twin-engine vibration exciter is given. Presented the laboratory stand for research joint work of the unbalanced electric vibrators.

Key words: vibrodrive, unbalance, synchronization, vibrational maintaining rotation, accelerometer.

REFERENCES

1. Poturayev V.N., Franchuk V.P., Chervonenko A.G. *Vibratory conveying machines*. – М.: Mashinostroenie, 1964. – 272 p. [in Russian]
2. Spivakosky A.O., Goncharevich N.F. *Vibratory conveyors, feeders and assistive devices*. – М.: Mashinostroenie, 1972. – 328 p. [in Russian]
3. Osadchiy V.V. Improving performance of electromechanical systems of multicomponent weight dosing // *Science magazine "Technical electrodynamic"*. – К.: Institute of Electrodynamics Academy of Sciences of Ukraine, 2010. – № 4. – PP. 48–53. [in Ukrainian]
4. *JVM catalog production* [electronic resource]. Mode of access: <http://www.jvm.com/unwuchtmotoren.php?LAId=2>
5. Chubik R.V., Yaroshenko L.V. *Controlled vibrating engineering machines*. – Vinnitsa: VNAU, 2011. – 355 p. [in Ukrainian]
6. Patent of Ukraine 89106 MPK B01 B06B 1/10. *Vibration exciter* / Emelianenko M.G., Udovichenko R.V.; stated 02.04.2008, publ. 25.12.2009, Bull. № 24. [in Ukrainian]
7. Serdyuk L.I. *Fundamentals of the theory, calculation and design of controlled unbalance vibration machines*: abstract thesis doct. of tech. science. – Kharkiv: KhPI, 1991. – 48 p. [in Russian]
8. Blekhman I.I. *Synchronization of dynamical systems*. – М.: Nauka, 1971. – 894 p. [in Russian]
9. Patent of USSR 1177142 B06B 1/16. *Double shaft vibrator* / Germanov A.P.; stated 22.07.1976, publ. 07.09.1985, Bull. № 33. [in Russian]
10. United States Patent 5903077. *Modular vibratory force generator, and method of operating same* / Garnjost K.D., Rey G.J.; stated 19.02.1998, publ. 11.05.1999.
11. United States Patent 6105685. *Adjusting device for and unbalance vibrator with adjustable centrifugal moment* / Bald H.B.; stated 22.06.1998, publ. 22.08.2000.
12. United States Patent 7582032. *Anti-vibratory device with rotary compensation weights* / Manfredotti T.C., Sequera D.N.; stated 17.01.2006, publ. 1.09.2009.

Стаття надійшла 13.07.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Чорним О.П.