

Nº 3 (90)

Вібрації в техніці та технологіях

2018

Гуров А.П. к.т.н., профессор Черно О.О. к.т.н., доцент Бугрім Л.І. к.т.н., доцент

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Поляков О.В. начальник відділу розробки інформаційних систем

Комунальне підприємство «Міський інформаційнообчислювальний центр»

Hurov A. Cherno O. Buhrim L.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Poliakov O.

Municipal company «City Information and Computing Center»

Постановка проблеми. Електромагнітний використовується вібраційному привод на обладнанні різного призначення. Найбільшого розповсюдження він отримав на вібраційних потребують пристроях, що керування амплітудою коливань. До таких пристроїв належать, зокрема, вібраційні живильники та дозатори [1,2]. Доцільним є також використання електромагнітного привода на високочастотних віброустановках, *и*становках наприклад, високочастотного ущільнення бетонних сумішей, що працюють на частотах, близьких до 100 Гц [3].

Для ефективного використання електромагнітного привода необхідно забезпечувати білярезонансний режим його роботи. Для цього жорсткість пружних елементів вібратора обирається таким чином, що резонансна частота установки знаходиться поблизу частоти коливань, необхідної для

УДК 621.3.07

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КЕРОВАНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВІБРАЦІЙНОГО ПРИВОДА

Електромагнітний вібраційний бовиап використовується переважно на установках, шо потребують регулювання параметрів вібрації в процесі роботи. Стаття присвячена експериментальному дослідженню динамічних властивостей системи автоматичного керування електромагнітним вібраційним приводом, що містить два замкнених контури керування: амплітудою та частотою. Частота вібрації регулюється таким чином, щоб величина фазового зрушення між гармоніками струму дорівнювала приписаному значенню, що відповідає білярезонансному режиму коливань, в якому установка має максимальний коефіцієнт корисної дії. Алгоритм керування був реалізований у мікроконтролера, на основі якого створена у програмі система автоматичного керування електромагнітним вібраційним приводом. Лабораторний стенд був побудований на основі вібраційної установки для виробництва тротуарної плитки. В ході експериментів досліджено динаміку процесів відстеження заданої амплітуди вібрації та автоматичного налаштування на білярезонансну частоту при різних значеннях коефіцієнтів регуляторів у контурах амплітуди та частоти. Результати експериментів підтвердили доцільність використання розглянутого закону керування амплітудою та частотою електромагнітного вібраційного привода.

Ключові слова: електромагнітний вібраційний привод, автоматичне керування амплітудою та частотою, експериментальні дослідження.

забезпечення технологічного процесу. При роботі в умовах зміни маси або механічних оброблюваного матеріалу властивостей частота віброустановки резонансна змінюється [4], тому необхідно змінювати частоту вимушених коливань, налаштовуючи систему на білярезонансний режим. Оскільки при цьому частота змінюється в досить невеликому діапазоні, це практично не впливає на якість технологічного процесу. З іншого боку, на частотах, близьких до резонансної, амплітуда коливань визначається в основному демпфувальними властивостями оброблюваного матеріалу, які можуть змінюватись в широкому діапазоні. Тому, при роботі в білярезонансному режимі необхідно автоматично регулювати також амплітуду коливань. Одночасне керування амплітудою та частотою електромагнітного вібраційного привода дає змогу забезпечувати необхідні



параметри вібрації при мінімальному енергоспоживанні вібраційного обладнання.

Таким чином, розвиток керованого електромагнітного вібраційного привода є актуальною науковою проблемою.

Аналіз останніх досліджень i публікацій. Проблемою створення систем електромагнітним автоматичного керування вібраційним приводом займалися українські вчені, серед яких О.П. Шовкун [2], і багато закордонних вчених, у тому числі В. Сінік [1] та Й. Куріта [4]. Авторами даної статті у роботі [5] запропоновано систему керування, функціональна схема якої наведена на рис. 1. На схемі прийнято наступні позначення: МК мікроконтролер; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ФОС – формувач опорних

сигналів; ДПФ1, ДПФ2, ДПФ3 – блоки дискретного перетворення Фур'є; РЧ – регулятор частоти; РА – регулятор амплітуди; ППП – послідовний прийомо-передавач; ПЧ – перетворювач частоти; ДС – датчик струму; А – акселерометр; РО – робочий орган віброустановки; КЕ – конструкційні елементи; ЕМВ – електромагнітний вібратор; ПМ – проміжна маса; ДВГ – динамічний віброгасник.

Система працює наступним чином. Сигнал акселерометра А надходить до блоку ДПФ1, де відбувається визначення амплітуди коливань робочого органу X_w, яка порівнюється з приписаним значенням амплітуди X_{w.pr}, і визначається помилка керування за амплітудою

$$\mathcal{E}_{x} = X_{w.pr} - X_{w}.$$



Рис. 1. Функціональна схема системи автоматичного керування електромагнітним вібраційним приводом

В залежності від величини помилки регулятор амплітуди РА через послідовний прийомо-передатчик ППП та перетворювач частоти ПЧ збільшує або зменшує амплітуду синусоїдальної напруги на обмотці вібратора, внаслідок чого амплітуда коливань робочого органу Х_w наближається до приписаного значення Х_{и.pr}. Сигнал датчика струму ДС надходить до блоків ДПФ2 і ДПФ3, де відбувається визначення різниці фаз Δ_{Φ31} між третьою та першою гармонічними складовими Величина Δφ31 порівнюється струму. 3 приписаним значенням $\Delta \phi_{31,pr}$, що відповідає режиму максимальної енергоефективності, і визначається фазою помилка за $\mathcal{E}_{\varphi} = \Delta \varphi_{31,pr} - \Delta \varphi_{31}$. В залежності від величини помилки \mathcal{E}_{o} регулятор частоти через послідовний прийомо-передатчик ΠΠΠ та перетворювач частоти ПЧ збільшує або

зменшує частоту синусоїдальної напруги на обмотці вібратора, внаслідок чого встановлюється і автоматично підтримується білярезонансний режим роботи віброустановки, що забезпечує мінімальне споживання електроенергії.

Запропонований у [6] алгоритм керування описується наступними різницевими рівняннями. Фази опорних сигналів:

$$\alpha_1(nT) = \overline{D}(nT)(\alpha_1(nT-T) + 2\omega_I(nT-T)T);(1)$$

 $\alpha_2(nT) = \overline{D}(nT)(\alpha_2(nT-T) + \omega_I(nT-T)T);(2)$

 $\alpha_3(nT) = \overline{D}(nT)(\alpha_3(nT-T) + 3\omega_I(nT-T)T),(3)$

де π – номер відліку:

Т – період дискретизації;

$$D(nT) = H(\alpha_2(nT-1) - 2\pi);$$
 (4)
 $H(x)$ – функція Хевісайда:

$$H(x) = \begin{cases} 1, \ \ddot{y} \hat{e} \dot{u} \hat{i} \quad x \ge 0; \\ 0, \ \ddot{y} \hat{e} \dot{u} \hat{i} \quad x < 0. \end{cases}$$

Опорні сигнали:

$$s_{2i-1}(nT) = \cos \alpha_i(nT); s_{2i}(nT) = -\sin \alpha_i(nT), i = 1, 2, 3.$$
 (5), (6)

Інтеграли добутків опорних сигналів з сигналами датчиків:

$$S_{a1}(nT) = \overline{D}(nT - T)(S_{a1}(nT - T) + a(nT)S_1(nT)T);$$
(7)

$$S_{a2}(nT) = \overline{D}(nT - T)(S_{a2}(nT - T) + a(nT)S_2(nT)T);$$
(8)

$$S_{I1}(nT) = \overline{D}(nT - T)(S_{I1}(nT - T) + I(nT)s_3(nT)T);$$
(9)

$$S_{I2}(nT) = \overline{D}(nT - T)(S_{I2}(nT - T) + I(nT)s_4(nT)T);$$
(10)

$$S_{I3}(nT) = \overline{D}(nT - T)(S_{I3}(nT - T) + I(nT)s_5(nT)T);$$
(11)

$$S_{I4}(nT) = \overline{D}(nT - T)(S_{I4}(nT - T) + I(nT)s_6(nT)T).$$
(12)

Дійсна та уявна частини комплексного переміщення робочого органу:

$$X_{w.re}(nT) = D(nT) \frac{S_{a1}(nT)}{4\pi\omega_{I}(nT-T)} + \bar{D}(nT)X_{w.re}(nT-T);$$
(13)

$$X_{w.im}(nT) = D(nT) \frac{S_{a2}(nT)}{4\pi\omega_{I}(nT-T)} + \bar{D}(nT)X_{w.im}(nT-T)$$
(14)

Дійсна та уявна частини першої гармонічної складової струму:

$$I_{1.re}(nT) = D(nT)S_{I1}(nT)\frac{\omega_{I}(nT-T)}{\pi} + \bar{D}(nT)I_{1.re}(nT-T);$$
(15)

$$I_{1.im}(nT) = D(nT)S_{12}(nT)\frac{\omega_{I}(nT-T)}{\pi} + \overline{D}(nT)I_{1.im}(nT-T)$$
(16)

Дійсна та уявна частини третьої гармонічної складової струму:

$$I_{3.re}(nT) = D(nT)S_{I3}(nT)\frac{\omega_I(nT-T)}{\pi} + \bar{D}(nT)I_{3.re}(nT-T);$$
(17)

$$I_{3.im}(nT) = D(nT)S_{I4}(nT)\frac{\omega_I(nT-T)}{\pi} + \overline{D}(nT)I_{3.im}(nT-T) \cdot$$
(18)
Biopaulii pobovoro oprany:
$$\sqrt{X_{w,rg}^2(nT) + X_{w,im}^2(nT)} \cdot$$
(19)
$$arg(x) = sgn(\operatorname{Re}(x))\left(\frac{\pi}{2} - \arccos\frac{\operatorname{Im}(x)}{|x|}\right) +$$

комплексного числа;

гармонічних складових струму:

 $+ sgn(Im(x))(1 - H(\operatorname{Re}(x)))\pi$ при

 $\operatorname{Re}(x)$, $\operatorname{Im}(x)$ – дійсна та уявна частина

 $\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1, \ \mathrm{якщо} \ x > 0; \\ 0, \ \mathrm{якщo} \ x = 0; \\ -1, \ \mathrm{якщo} \ x < 0. \end{cases}$

 $\varphi_{31}(nT) = \varphi_3(nT) - 3\varphi_1(nT) \,.$

Відносне фазове зрушення 3-ї та 1-ї

 $|\operatorname{Re}(x)| > |\operatorname{Im}(x)|;$

(23)

(24)

Амплітуда вібрації робочого органу:

$$X_{w}(nT) = \sqrt{X_{w.re}^{2}(nT) + X_{w.im}^{2}(nT)} .$$
(19)

Амплітуди гармонічних складових струму:

$$I_{k}(nT) = \sqrt{I_{k.re}^{2}(nT) + I_{k.im}^{2}(nT)}, k = 1, 3. (20)$$

Фази гармонічних складових струму відносно опорних сигналів:

$$\varphi_k = \arg(I_{k.re} + jI_{k.im}), \qquad (21)$$

$$\arg(x) = \operatorname{sgn}(\operatorname{Im}(x)) \operatorname{arccos} \frac{\operatorname{Re}(x)}{|x|}$$
 при $|\operatorname{Re}(x)| \le |\operatorname{Im}(x)|;$ (22)

$$|\mathbf{IC}(\lambda)| \ge |\mathbf{III}(\lambda)|^{\frac{1}{2}}$$

Помилки за амплітудою та фазою:

$$\varepsilon_{x}(nT) = X_{w,pr}(nT) - X_{w}(nT); \varepsilon_{\varphi}(nT) = \varphi_{31,pr}(nT) - \varphi_{31}(nT).$$
(25),(26)

Сигнали на виходах ланок із зонами нечутливості:

$$\varepsilon'_{x}(nT) = \begin{cases} \varepsilon_{x}(nT) - h_{DZ1} \operatorname{пpu} \varepsilon_{x}(nT) > h_{DZ1}; \\ 0 \operatorname{пpu} - h_{DZ1} \le \varepsilon_{x}(nT) \le h_{DZ1}; \\ \varepsilon_{x}(nT) + h_{DZ1} \operatorname{пpu} \varepsilon_{x}(nT) < -h_{DZ1}; \\ \varepsilon_{x}(nT) - h_{DZ2} \operatorname{npu} \varepsilon_{\phi}(nT) > h_{DZ2}; \\ 0 \operatorname{npu} - h_{DZ2} \le \varepsilon_{\phi}(nT) \le h_{DZ2}; \\ \varepsilon_{\phi}(nT) + h_{DZ2} \operatorname{npu} \varepsilon_{\phi}(nT) < -h_{DZ2}, \end{cases}$$
(28)

де $h_{_{DZ1}}$ і $h_{_{DZ2}}$ – величини ширини зони нечутливості регуляторів амплітуди і частоти відповідно.



Вихідні сигнали пропорційного та інтегрального регуляторів амплітуди:

$$U_{p}(nT) = k_{p} \varepsilon'_{x}(nT); U_{I}(nT) = U_{I}(nT - T) + k_{i1} \varepsilon'_{x}(nT)T.$$
(29), (30)

Вихідний сигнал ПІ-регулятора амплітуди:

$$U_{PI}(nT) = U_{P}(nT) + U_{I}(nT).$$
(31)

Вихідний сигнал інтегрального регулятора частоти:

$$\omega_{I}(nT) = \omega_{I}(nT - T) + k_{i2}\varepsilon'_{\omega}(nT)T.$$
(32)

Результати проведенного дослідження у [5] моделювання перехідних процесів підтвердили працездатність запропонованого алгоритму керування і показали його переваги у порівнянні з існуючими аналогами. Але для того, щоб ці результати вважати достовірними, необхідно провести натурний експеримент.

Формулювання мети дослідження. Метою роботи є реалізація запропонованого у попередньому дослідженні [5] алгоритму керування електромагнітним вібраційним приводом і проведення експериментального дослідження його роботи.

Технічна реалізація системи керування. На основі функціональної схеми (рис. 1) було створено керуючий модуль, до якого увійшли: мікроконтролер ATmega16, LCDдисплей, матрична клавіатура, перетворювач інтерфейсу UART/RS484 для підключення до перетворювача частоти. Акселерометр ADXL78 AD22279) датчик (модель i струму ACS712ELCTR-05B підключаються до аналогових входів мікроконтролера.

На основі рівнянь (1) - (32) з урахуванням інтерфейсу оператора, прийому сигналів з датчиків, виводу керуючого сигналу до перетворювача частоти, побудовано алгоритм керуючої програми, яка складається 3 основного циклу програми (рис. 2), підпрограми обробки переривань аналого-цифрового перетворювача (АЦП) (рис. 3), підпрограми обробки переривань таймера 1 і підпрограми обробки переривань прийомо-передатчика.

Основний цикл програми 2) (рис. починається одразу після налаштувань та ініціалізації периферії. В тілі основного циклу виконуються операції обробки клавіш та виводу інформації на дисплей, що забезпечує програмування користувачем можливість режиму роботи, параметрів системи та вхідних сигналів. Програмою передбачено 3 режими роботи: 0-й, 1-й і 2-й. В 0-му режимі частота і амплітуда напруги на обмотці вібратора задаються вручну. В 1-му режимі частота задається вручну, а амплітуда напруги регулюється автоматично за принципом зворотного зв'язку за амплітудою вібрації. При цьому користувачем задається закон зміни в часі приписаного значення амплітуди: константа, або лінійний із заданою швидкістю та обмеженням. У 2-му режимі відбувається автоматичне керування і амплітудою, i частотою.





Рис. 3. Підпрограма обробки переривань АЦП

Закон керування реалізується у підпрограмі обробки переривань АЦП (рис. 3), на який по черзі потрапляють сигнали з акселерометра і датчика струму. Вихід акселерометра підключено до 0-го каналу мультиплексора АЦП, а вихід датчика струму – до 2-го.

Алгоритм підпрограми обробки сигналу акселерометра наведено на рис. 4. Спочатку зберігається отримана з АЦП величина прискорення і запускається процес обчислення струму. Далі відбувається інтегрування добутків прискорення з опорними сигналами $s_1(t)$ і $s_2(t)$ згідно (7), (8) при $\overline{D}(nT - T) = 1$.

Далі, за рівнянням (25) обчислюється помилка за амплітудою, за рівнянням (27) формується сигнал на виході ланки із зоною нечутливості, за рівняннями (29) – (31) реалізується цифровий ПІ-регулятор амплітуди, на виході якого – амплітуда напруги, що подається на обмотку вібратора.

Аналогічно обчислюється частота вихідної напруги: згідно (26) визначається помилка за фазою, згідно (28) реалізується ланка із зоною нечутливості і згідно (32) – інтегральний регулятор частоти. Кожного разу по завершенні періоду опорних сигналів

 $s_3(nT)$ і $s_4(nT)$, частота яких складає ω_{I} , виконується підпрограма обчислення амплітуди вібрації та фазового зсуву між гармоніками струму. В ній відбувається визначення комплексного переміщення (рівняння (13), (14)) та комплексних гармонік струму (рівняння (15) -(18)), обнулення інтегралів добутків опорних сигналів з сигналами датчиків (рівняння (7) - $\overline{D}(nT-T)=0),$ (12) при визначаються амплітудні значення переміщення (рівняння (19)) та гармонік струму (рівняння (20)), обчислюється різниця фаз між 1-ю та 3-ю гармоніками струму (рівняння (21) - (24)), яка приводиться до діапазону – $\pi/2..3\pi/2$.

Алгоритм підпрограми обробки сигналу датчика струму наведено на рис. 5. Після збереження оцифрованого значення струму, переключення та запуску АЦП, відбувається числове інтегрування добутків струму з опорними сигналами $s_3(t)...s_6(t)$ за рівняннями (9) – (12) при $\overline{D}(nT-T)=1$, після чого – оновлення значень опорних сигналів за рівняннями (1) – (6).

В підпрограмі обробки переривання таймера 1 відбувається формування сигналу



2018

Вібрації в техніці та технологіях

завдання за амплітудою $X_{w.pr}(nT)$. Підпрограма обробки переривань прийомопередатчика здійснює формування та відправку до перетворювача частоти пакетів даних, що містять значення амплітуди та частоти напруги, яку потрібно подавати на обмотку електромагнітного вібратора.



Рис. 4. Підпрограма обробки сигналу акселерометра





Опис лабораторного стенда. За основу стенда було взято вібраційну установку для виробництва тротуарної плитки вагою до 10 кг (рис. 6). Як оброблюваний матеріал замість бетонної суміші використовувався пісок. Величини рухомих мас та жорсткості їх підвісу наведено у таблиці 1. До складу лабораторного стенду увійшли також система керування, датчики струму, напруги та вібраційного прискорення, а також мікросистема збору даних m-DAQ з інтерфейсом USB, підключена до персонального комп'ютера.

Таблиця 1

| | Робочий орган | Проміжна конструкція | Динамічний віброгасник | Оброблюваний матеріал |
|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Маса, кг | 8,9 | 18 | 3,4 | 5 |
| Жорсткість підвісу, Н/м | 1,52 [.] 10 ⁶ | 0,3·10 ⁶ | 0,55 [.] 10 ⁶ | - |

Хід проведення та результати експерименту. В ході експерименту було досліджено процес запуску установки з виходом на заданий рівень вібрації і процес налаштування на білярезонансну частоту, що відповідає заданому фазовому зрушенню між 3-ю та 1-ю гармоніками струму. Запуск здійснювався у 1-му режимі (фіксована частота) при лінійному зростанні приписаного значення амплітуди до рівня 0,5 мм за 0,2 с, після чого воно залишалося константою.

Зa отриманими графіками запуску системи на дорезонансній частоті 42 Гц (рис. 7) бачимо, що час перехідного процесу складає близько 0,5 с (рис. 7, а), а перерегулювання майже не перевищує ширину зони нечутливості (пунктирні лінії). Під час перехідного процесу спостерігаємо коливання амплітуди вібрації, які зникають у сталому режимі. Це обумовлено явищем фазової модуляції внаслідок накладання двох частот.

На рис. 8 наведені аналогічні графіки для запуску установки на білярезонансній частоті

50,2 Гц. В цьому випадку коливання амплітуди та перерегулювання практично відсутні при такому ж часі перехідного процесу.

Далі, було досліджено роботу системи в режимі автоматичного налаштування на білярезонансну частоту (2-й режим). Для цього установку було запущено в 1-му режимі на частоті 42 Гц, а потім переведено у 2-й режим. В результаті частота вібрації стала поступово збільшуватись, доки досягла не білярезонансної частоти 50,2 Гц, що відповідає фазовому зрушенню 107° (рис. 9, а). При цьому амплітуда вібрації автоматично підтримувалась в околі приписаного значення 0.504 мм (рис. 9, б).

Коефіцієнт інтегрального регулятора в контурі частоти було навмисно занижено таким чином, щоб швидкість її регулювання була значно меншою, ніж швидкість регулювання амплітуди. В іншому випадку, швидке наближення до резонансу викликає великі сплески амплітуди вібрації.

№ 3 (90)

2018

Вібрації в техніці та технологіях



Рис. 6. Віброустановка:

1 – робочий орган; 2 – проміжна конструкція; 3 – динамічний віброгасник; 4 – осердя електромагніта; 5 – обмотки; 6 – якір; 7 – напільні резинові амортизатори; 8 – сталеві одновиткові пружини віброгасника; 9 – прорізні мембрани







Рис. 8. Графіки перехідних процесів у 1-му режимі на частоті 50,2 Гц а – амплітуда вібрації робочого органу; б – діючі значення струму та напруги



Рис. 9.Графіки процесів налаштування на білярезонансну частоту а – частота і фазове зрушення; б – амплітуда вібрації робочого органу

Висновки. Закон керування частотою та амплітудою електромагнітного вібраційного привода використанням алгоритму 3 дискретного перетворення Фур'є, є досить простим у реалізації. Для його здійснення достатньо ресурсів 8-бітного мікроконтролера АТтеда-16, на основі якого було побудовано керуючий модуль. Експерименти показали, що розроблена система керування автоматично амплітуду підтримує задану вібрації i автоматично налаштовує вібраційну установку на білярезонансний режим шляхом зміни частоти вимушених коливань таким чином, щоб фазове зрушення між 3-ю та 1-ю гармоніками струму відповідало заданому значенню. Це дає можливість забезпечити якість технологічного процесу при мінімальному енергоспоживанні. Перспективним напрямом для подальших досліджень e удосконалення структури

регуляторів частоти і амплітуди з метою підвищення показників якості керування.

Список використаних джерел

1. Sinic V. Optimization of the operation and frequency control of electromagnetic vibratory feeders / V. Sinic, Z. V. Despotovic, I. Palinkas // Elektronika ir Elektrotechnika. – 2016. – №1, Vol. 22. – pp. 24 – 30.

2. Шовкун О.П. Електромагнітний вібраційний привід живильника / О.П. Шовкун, І.Р. Козбур // Матеріали XIX наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя. – Тернопіль: ТНТУ, 2016. – С. 131-132.

3. Ланець О.С. Синтез конструкції та дослідження роботи резонансного двомасового вібраційного стола з електромагнітним приводом / О.С. Ланець, В.М. Боровець,



2018 та технологіях

О.В. Ланець, Я.В. Шпак, В.І. Лозинський // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2015. – Вип. 49. – С. 36-60.

4. Kurita Y. Highspeed fixed-quantity supply of works by intermittent drive of vibration transportation machine / Y. Kurita, Y. Matsumura, T. Masuda, Y. Okamoto, F. Yurugi // Transactions of the Japan society of mechanical engineers. Series C. – 2009. – №6, Vol. 75, issue 754. – pp. 1610-1617.

5. Черно О.О. Удосконалений алгоритм керування електромагнітним вібраційним приводом / О.О. Черно, А.П. Гуров // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2018. – Вип. 2/2018 (42). – С. 23-29.

Список джерел у транслітерації

1. Sinic V. & Despotovic Z. V. & Palinkas I. (2016). [Optimization of the operation and frequency control of electromagnetic vibratory feeders]: Elektronika ir Elektrotechnika, №1, Vol. 22., 24-30.

2. Shovkun O. P. & Kozbur I. R. (2016). Elektromahnitnyy vibratsiynyy pryvid zhyvylnyka [Electromagnetic vibration drive of the feeder]. *Materialy XIX naukovoyi konferentsiyi TNTU im. I. Pulyuya – Transactions of the XIX scientific conference of TNTU named by I. Puluj*, 131-132 [in Ukrainian].

3. Lanets O. S. & Borovets V. M. & Lanets O. V. &Shlapak Y. V.& Lozynskyy V. I. (2015). Syntez konstruktsiyi ta doslidzhennya roboty rezonansnoho dvomasovoho vibratsivnoho stola z elektromahnitnym pryvodom [Synthesis of the construction and research of operation of a resonant two-mass vibration table with electromagnetic actuator]. Avtomatyzatsiya vyrobnychykh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni - Industrial Process Automation in Engineering and Instrumentation, 49, 36- 60 [in Ukrainian].

4. Kurita Y. & Matsumura Y. & Masuda T. & Okamoto Y. & Yurugi F. (2009). Highs peed fixedquantity supply of works by intermittent drive of vibration transportation machine. *Transactions of the Japan society of mechanical engineers. Series C*, 6, 75, 754, 1610-1617.

5. Cherno O. O. & Hurov A. P. (2018). Udoskonalenyy alhorytm keruvannya elektromahnitnym vibratsiynym pryvodom [Improved algorithm of electromagnetic vibration drive system control]. *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy*. *Shchokvartalnyy naukovo-vyrobnychyy zhurnal – Electromechanical and energy saving systems*. *Scientific production journal*, 2, 23-29 [in Ukrainian].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВИБРАЦИОННОГО ПРИВОДА

вибрационный Электромагнитный привод используется преимущественно на *vстановках.* требующих регулирования параметров вибрации в процессе работы. экспериментальному Статья посвяшена исследованию динамических свойств системы автоматического управления электромагнитным вибрационным приводом, содержащей два замкнутых контура управления: амплитудой частотой. и Частота вибрации регулируется таким образом, чтобы величина фазового сдвига между гармониками тока была равна предписанному значению, соответствущему околорезонансному режиму колебаний. R котором установка имеет максимальный коэффициент полезного действия. Алгоритм управления был реализован в программе микроконтроллера, на основе которого создана система автоматического управления электромагнитным вибрационным приводом. Лабораторный стенд был построен на основе вибрационной *vстановки для производства тротуарной* плитки. В ходе экспериментов исследована динамика процессов отслеживания заданной амплитуды вибрации и автоматической настройки на околорезонансную частоту при различных значениях коэффициентов регуляторов в контурах амплитуды и частоты. Результаты экспериментов подтвердили целесообразность использования рассматриваемого закона управления амплитудой и частотой электромагнитного вибрационного привода.

Ключевые слова: электромагнитный вибрационный привод, автоматическое управление амплитудой и частотой, экспериментальные исследования.

EXPERIMENTAL STUDY OF CONTROLLED ELECTROMAGNETIC VIBRATION DRIVE

Electromagnetic vibration drive is used mainly on vibration conveyors, feeders and other vibro-technological devices requiring automatic control of vibration parameters during operation. The purpose of the work is an experimental study of the dynamic properties of the automatic control system of electromagnetic vibration drive, which contains two control circuits: amplitude and frequency. The amplitude circuit contains an accelerometer and an amplitude detector. The frequency circuit contains the current sensor and the detector of the phase shift between the third and first harmonic components of the current. The



2018

vibration frequency is adjusted so that the phase equal to the prescribed shift is value corresponding to the near-resonant oscillation mode in which the device has a maximum efficiency. The amplitude and phase shift detectors are based on the discrete Fourier transform algorithm of the accelerometer and the current sensor sianals. The control algorithm was implemented in the program of the control system microcontroller. The laboratory standis based on the vibration device for the production of sidewalk tiles weighing up to 10 kg. Instead of a concrete mixture in experiments, sand weighing about 5 kg

was used. In the course of experiments, the dynamics of the processes of tracking the given vibration amplitude and the automatic adjustment to the near-resonant frequency at different values of the coefficients of the regulators of the amplitude and frequency circuits was investigated. The results of experiments confirmed the advisability of using the electromagnetic vibration drive amplitude and frequency control law.

Keywords: electromagnetic vibration drive. automatic control of amplitude and frequency, experimental research.

Відомості про авторів

Гуров Анатолій Петрович – к.т.н., професор кафедри автоматики, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025, Україна, e-mail: anatoly.gurov@nuos.edu.ua.

Черно Олександр Олександрович – к.т.н., доцент, зав. кафедри комп'ютеризованих систем університет кораблебудування управління, Національний iм. адмірала Макарова, просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025, Україна, e-mail: oleksandr.cherno@nuos.edu.ua.

Бугрім Леонід Іванович – к.т.н., доцент кафедри автоматики, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025, Україна, e-mail: leonid.bugrim@nuos.edu.ua

Поляков Олександр Вікторович – начальник відділу розробки інформаційних систем. Комунальне підприємство «Міський інформаційно-обчислювальний центр», вул. Адміральська, 20, м. Миколаїв. 54001. Україна, e-mail: polvakov@mkrada.gov.ua.

Гуров Анатолий Петрович – к.т.н., профессор кафедры автоматики, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, просп. Героев Украины, 9, г. Николаев, 54025, Украина, e-mail:anatoly.gurov@nuos.edu.ua.

Черно Александр Александрович – к.т.н., доцент, зав. кафедры компьютеризированных систем управления, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова. просп. Героев Украины, 9, г. Николаев, 54025, Украина, e-mail: oleksandr.cherno@nuos.edu.ua.

Бугрим Леонид Иванович – к.т.н., доцент кафедры автоматики, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, просп. Героев Украины, 9, г. Николаев, 54025, Украина, e-mail: leonid.bugrim@nuos.edu.ua.

Поляков Александр Викторович – начальник отдела разработки информационных систем, Коммунальное предприятие «Городской информационно-вычислительный центр», ул. Адмиральская, 20, г. Николаев, 54001, Украина, e-mail: polyakov@mkrada.gov.ua.

Hurov Anatolii - PhD. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Automatics, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, av. Geroiv Ukrainy, 9, Mykolaiv, 54025, Ukraine, e-mail: anatolv.gurov@nuos.edu.ua.

Cherno Oleksandr - PhD. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Department of Computerized Control Systems, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, av. Geroiv Ukrainy, 9, Mykolaiv, 54025, Ukraine, e-mail: oleksandr.cherno@nuos.edu.ua.

Buhrim Leonid - PhD. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Automatics, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, av. Geroiv Ukrainy, 9, Mykolaiv, 54025. Ukraine. e-mail: leonid.bugrim@nuos.edu.ua.

Poliakov Oleksandr - the Head of the Information Systems Development Department, Municipal company "City Information and Computing Center", Admiralska street, 20, Mykolaiv, 54001, Ukraine, e-mail: polyakov@mkrada.gov.ua.