

of geological faults and characteristics of the strength properties of the massif within the faults and beyond them. We have designed and produced the special sensor for measurement in the mine "Dneprovskaya".

Keywords: *acoustic control, complex-structured rock medium, amplitude-frequency characteristic*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук М.М. Довбнічем. Дата надходження рукопису 16.11.12.

УДК: 621.01, 621.09

**І.В. Кузьо, д-р техн. наук, проф.,
О.В. Ланець,
В.М. Гурський, канд. техн. наук**

Національний університет „Львівська політехніка“, м. Львів,
Україна, e-mail: olena-lanec@mail.ru

ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДВОЧАСТОТНИХ РЕЗОНАНСНИХ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН З ІМПУЛЬСНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ЗБУРЕННЯМ

**I.V. Kuzo, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
O.V. Lanets,
V.M. Gurskyi, Cand. Sci. (Tech.)**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,
e-mail: olena-lanec@mail.ru

SUBSTANTIATION OF TECHNOLOGICAL EFFICIENCY OF TWO-FREQUENCY RESONANT VIBRATION MACHINES WITH PULSE ELECTROMAGNETIC DISTURBANCE

Мета. Підвищення технологічної ефективності двомасових вібраційних одночастотних резонансних машин шляхом переведенням їх у нелінійні системи, зокрема реалізацією асиметричної кусково-лінійної пружної характеристики.

Методика. Полягає у чисельному моделюванні та порівняльному аналізі діючих значень пришвидшень робочих органів двомасових вібраційних машин з лінійними та кусково-лінійними пружними характеристиками. При цьому, раціональним виявилось використання імпульсного електромагнітного збурення за однократною схемою живлення. Змінне тягове зусилля однократно електромагніту трактується на основі ряду Фур'є полічастотним, під гармоніки якого синтезуються пружні асиметричні кусково-лінійні параметри вібраційної системи.

Результати. Синтезовано пружні параметри асиметричної кусково-лінійної характеристики для реалізації двочастотних резонансних режимів роботи двомасових вібраційних машин з імпульсним електромагнітним збуренням. Чисельним моделюванням вібраційних систем отримано часові залежності переміщень та пришвидшень мас, проведений спектральний аналіз отриманих характеристик. Встановлено наявність ударних пришвидшень у запропонованій вібраційній двомасовій системі з асиметричною кусково-лінійною пружною характеристикою. Введено критерії для оцінки технологічної та енергетичної ефективності запропонованих двочастотних резонансних машин з імпульсним збуренням та обґрунтовано їх переваги над відповідними одночастотними системами. Технологічну ефективність нелінійних систем підтверджено за рахунок реалізації режимів роботи з ударними пришвидшеннями, сумарні діючі значення яких протягом періоду переважають над відповідними значеннями в лінійних системах. Для встановлення величини енергоспоживання використовувалися діючі значення потужностей, необхідні на приведення в рух механічних систем.

Наукова новизна. Полягає в подальшому розвитку нелінійних вібраційних машин з електромагнітним збуренням. Зокрема, уперше апробовано механізм реалізації асиметричних резонансних режимів роботи двомасових вібраційних систем із синтезованими кусково-лінійними пружними характеристиками з урахуванням особливостей імпульсного електромагнітного збурення.

Практична значимість. Впровадженням до структури двомасової вібраційної системи асиметричних кусково-лінійних пружних характеристик та використанням імпульсного збурення підвищується технологічна та енергетична ефективність базових лінійних одночастотних машин.

Ключові слова: *резонансна вібраційна машина, кусково-лінійна пружна характеристика, електромагнітний привід, імпульсне збурення, ударні пришвидшення*

Постановка проблеми. Більшість резонансних вібраційних машин побудована на лінійній двомасо-

вій коливальній системі, чим забезпечуються одночастотні (гармонійні) коливання робочих органів. Зважаючи на вимоги енергоощадливості, простоти та надійності в роботі, для резонансних систем для збурення використовують електромагнітні віброзбу-

дживачі (ЕМВ). У силу зростання якості та технологічних вимог постає необхідність у підвищенні ефективності типових резонансних машин, їх здатності до реалізації більш широкого спектру режимів роботи. Одним із напрямів для покращення роботи одночастотних машин є їх структурне перетворення в нелінійні системи за рахунок реалізації нелінійної пружної характеристики. Однак, конструктивна реалізація певного типу нелінійності для машин з малими коливаннями та гармонійним збуренням не дає суттєвого ефекту. У більшій мірі ефективними є віброударні системи, здатні відтворювати не тільки основний, але й суб- і супергармонійний резонанс. Тому задача наближення традиційних резонансних машин за параметрами роботи до більш ефективних полічастотних і віброударних машин за рахунок раціонального структурно-параметричного синтезу потребує ґрунтовного аналізу.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження в області функціонування резонансних нелінійних вібраційних машин і випробувальних стендів з ЕМВ подаються у працях М.В. Хвінгії, К.М. Рагульської [1], Б.І. Крюкова, С.Л. Цифанського [2], О.Є. Божко [3], І.І. Назаренка та інших учених.

У роботах [2, 3] встановлено, що за характером роботи резонансні машини, з урахуванням динаміки ЕМВ, відносяться до класу нелінійних систем, в яких нелінійність закладена в механізм реалізації змінного у часі тягового зусилля, що параметрично залежить від роботи механічної системи. Як показують дослідження та деякі результати чисельного моделювання роботи електровібраційних систем [2, 4], визначальними у характері коливань є динамічні можливості механічної системи.

Використання віброударних та полічастотних коливань [5–7] є запорукою не тільки високої ефективності, але й необхідністю для здійснення технологічних процесів грохочення, ущільнення в надскладних за фізико-механічними властивостями полідисперсних середовищах енергоємних галузей промисловості. Відомо, що використання типового ЕМВ із відповідним принципом живлення [8] уможливає його роботу у складі віброударних сильнонелінійних машин будіндустрії. Проте, питання повного використання можливостей класичного ЕМВ із традиційними схемами живлення не вивчено досконало, оскільки трактування його реальних силових характеристик доцільно узгоджувати з параметрами та динамікою нелінійної вібраційної системи. Тому, комплексне поєднання особливостей роботи ЕМВ із якісними змінами у структурі вібраційної системи дозволить отримати ефективну машину, в якій відносно слабкі нелінійні явища підсилюються засобами самого приводу.

Цілі статті: 1) впровадження конструктивних нелінійних ефектів у традиційних резонансних вібраційних машинах з урахуванням специфіки роботи приводу системи з метою підвищення ефективності роботи; 2) вибір критеріїв оцінки та порівняльний аналіз резонансних вібраційних систем.

Виклад основного матеріалу. На рис.1 представлено структурну схему вібраційної машини у складі активної 1 та реактивної 2 коливальних мас, з'єднаних плоскою пружиною 3. Для збурення таких систем у резонансному режимі використовують, як правило, електромагнітні віброзбуджувачі – осердя з котушками 5 і якоря 6, увімкнені за одно- чи двотактними схемами. Вібраційна система встановлена на раму через віброізолятори 4. Особливістю представленої машини є використання в її структурі двох додаткових абсолютно жорстких упорів 7, що дозволяють встановлювати відповідну пружність у системі та налагоджувати її на різні власні частоти коливань і відповідні режими. Машина може бути адаптована на одно- та двочастотні режими роботи за рахунок відповідного встановлення упорів 7 і різних схем вмикання котушок ЕМВ.

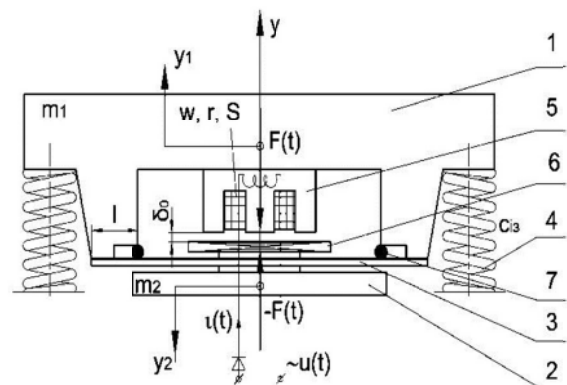


Рис. 1. Структурна схема вібраційної машини з імпульсним збуренням та асиметричною пружною характеристикою

Дослідження та порівняльний аналіз будемо проводити на базі схеми, коли пружний елемент контактує з додатковими упорами та змінює характеристику в одному із напрямків від положення статичної рівноваги. Асиметричну пружнодисипативну характеристику системи подамо у вигляді

$$R(y_1(t), y_2(t)) = \begin{cases} c_2(y_1(t) - y_2(t)) + b_2(\dot{y}_1(t) - \dot{y}_2(t)), \\ y_1(t) + y_2(t) > 0, \\ c_1(y_1(t) - y_2(t)) + b_1(\dot{y}_1(t) - \dot{y}_2(t)), \\ y_1(t) + y_2(t) \leq 0. \end{cases} \quad (1)$$

Пружні та дисипативні параметри визначаються з умови забезпечення двох власних частот коливань (кратністю 2) у двомасовій системі

$$c_1 = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \omega_{01}^2;$$

$$c_2 = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (2\omega_{01})^2 = 4c_1; \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{c_1 \gamma}{\omega}, \quad b_2 = \frac{c_2 \gamma}{2\omega} = 2b_1,$$

де γ – коефіцієнт внутрішнього (непружного) опору матеріалу пружин.

Амплітудне значення тягового зусилля ЕМВ F_0 визначається параметрами котушки та розмірами магнітопроводу [3]

$$F_0 = \frac{n\mu_0 S w^2 U_0^2}{(2r \delta_0)^2 + (\omega\mu_0 S w^2)^2}, \quad (3)$$

де n – кількість ЕМВ (однотактних); U_0 – амплітудне значення напруги живлення; ω – частота коливань напруги живлення; r – активний опір обмотки; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна проникливість повітря; δ_0 – номінальне (постійне) значення повітряного проміжку; S – площа поверхні полюсів електромагніту; w – кількість витків котушки ЕМВ.

При однотактній схемі живлення (однопівперіодне випрямлення) на паралельно увімкнені котушки ЕМВ подається випрямлений (пульсуючий) струм, що породжує імпульсне силове збурення вібраційної машини. Двотактна схема являє собою використання дзеркально встановлених однотактних ЕМВ, увімкнених із зсувом фаз $\pi/2$. Тому для однакового числа ЕМВ закони зміни тягових зусиль за одно- та двотактних схем живлення набудуть вигляду

$$F(t) = \frac{2F_0}{\pi} \left(\begin{aligned} &1 + \frac{\pi}{2} \sin(\omega t) - \frac{2}{3} \cos(2\omega t) - \\ &\frac{2}{15} \cos(4\omega t) - \frac{2}{35} \cos(6\omega t) \end{aligned} \right), \quad (4)$$

$$\tilde{F}(t) = F_0 \sin(\omega t), \quad (5)$$

причому, середні значення цих сил, узяті по модулю, є рівними

$$\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} |F(t)| dt = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} |\tilde{F}(t)| dt,$$

а діюче значення тягового зусилля при однотактній схемі живлення переважає відповідне значення за двотактної схеми

$$\sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} F(t)^2 dt} > \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \tilde{F}(t)^2 dt}.$$

У такому підході оцінюватимуться дві вібраційні системи з однаковими інерційними параметрами, з різними пружними характеристиками та характером збурення.

Доцільність використання імпульсного збурення в запропонованій вібраційній машині кусково-лінійного типу полягає у синтезі пружних параметрів машини (2) з наперед закладеними значеннями двох власних частот коливань, що підсилюються обома гармоніками імпульсного тягового зусилля (4) в дорезонансному режимі з налагодженням z

$$\omega_{01} = \omega / z, \quad 2\omega_{01} = 2\omega / z.$$

На відміну від цього, традиційні резонансні (одночастотні) машини здатні відреагувати лише на одну гармоніку змінного тягового зусилля.

Диференціальні рівняння руху двомасової (дво-частотної) резонансної вібраційної машини з асиметричною пружно-дисипативною характеристикою виду (1) з імпульсним збуренням (4) мають наступний вигляд

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1(t) + c_{13} \cdot y_1(t) + b_{13} \cdot \dot{y}_1(t) + \\ + R(y_1(t), y_2(t)) = F(t) \\ m_2 \ddot{y}_2(t) - R(y_1(t), y_2(t)) = -F(t) \end{cases}. \quad (6)$$

Вказана система диференціальних рівнянь є суттєво нелінійною. Підхід у її розв'язуванні асимптотичними методами теорії нелінійних коливань запропонований у [9] з тією відмінністю, що розглянуто його в умовах гармонійного збурення. Для нашого випадку з імпульсним збуренням системи такий аналіз є відсутній. Тому для адекватної оцінки характеру коливань вібраційної системи для двох випадків збурення будемо користуватися обчислювальним методом Адамса при розв'язуванні систем диференціальних рівнянь. Хоча коливання традиційної одночастотної резонансної вібраційної системи з гармонійним збуренням (для двотактної схеми живлення ЕМВ) описуються системою лінійних диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} m_1 \ddot{\tilde{y}}_1(t) + c_{13} \cdot \tilde{y}_1(t) + b_{13} \cdot \dot{\tilde{y}}_1(t) + \\ + c_1 (\tilde{y}_1(t) - \tilde{y}_2(t)) + b_1 (\dot{\tilde{y}}_1(t) - \dot{\tilde{y}}_2(t)) = \tilde{F}(t) \\ m_2 \ddot{\tilde{y}}_2(t) - c_1 (\tilde{y}_1(t) - \tilde{y}_2(t)) - \\ b_1 (\dot{\tilde{y}}_1(t) - \dot{\tilde{y}}_2(t)) = -\tilde{F}(t) \end{cases}. \quad (7)$$

Для проведення чисельного аналізу прийємомо вихідні та отримаємо розрахункові дані: $m_1 = 500 \text{ кг}$; $m_2 = 350 \text{ кг}$; $z = 0,98$; $\omega = 314 \text{ рад/с}$; $\gamma = 0,06$; $c_1 = 2,116 \cdot 10^7 \text{ Н/м}$; $c_2 = 8,463 \cdot 10^7 \text{ Н/м}$; $c_{ib} = 2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$; $b_1 = 4041 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$; $b_2 = 8082 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$; $b_{ib} = 38,2 \text{ Н}\cdot\text{с/м}$; $F_0 = 5000 \text{ Н}$.

Асиметрична пружна характеристика вібраційної машини показана на рис. 2. Часові залежності тягових зусиль при одно- (4) та двотактному (5) вмиканнях ЕМВ з амплітудним значенням F_0 показані на рис. 3. Причому такі характери збурення для обох систем попередньо не встановлюють рівнозначності енергій, що підводиться до порівнюваних машин. Для кількісної оцінки реального енергоспоживання користуватимемося результатами моделювання, де отримано часові залежності коливань (рис. 4, а) і пришвидшень (рис. 4, б) мас, зокрема їх представлено для активної маси (робочого органа).

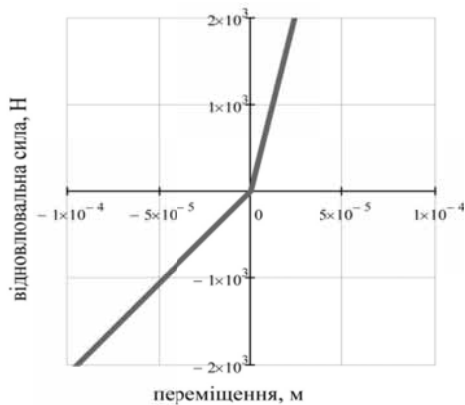


Рис. 2. Асиметрична пружна характеристика запропонованої вібраційної системи

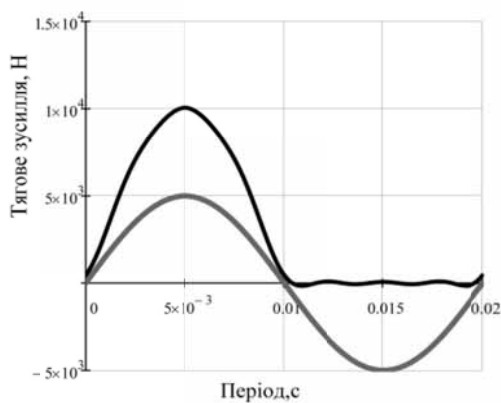


Рис. 3. Часові залежності тягових зусиль одно- (1) та двотактних (2) ЕМВ

Традиційна машина працює в гармонійному режимі з відповідними амплітудними значеннями переміщень та прискорень, причому амплітуда її коливань перевищує амплітуду коливань нелінійної

системи з імпульсним збуренням. Однак, коливання робочого органа імпульсної машини вирізняється наявністю ударних пришвидшень, що за максимальною величиною перевищують відповідні значення в лінійній машині в 1,43 рази.

Отримані часові залежності пришвидшення робочих органів досліджуваних вібраційних систем підлягають розкладу на гармонійні складові на основі Фур'є-аналізу

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T \ddot{y}_1(t) \cos(k\omega t) dt ;$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T \ddot{y}_1(t) \sin(k\omega t) dt ;$$

$$k = 0 \dots N ; i = 1 \dots N$$

для встановлення амплітудних значень та фаз N -числа гармонік

$$z_i = \sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2} ; \varphi_i = \arctg(b_i / a_i) .$$

Для досліджуваних вібраційних систем результати амплітудно-частотного аналізу та спектри пришвидшень робочих органів представлено на рис. 5 і в табл. 1.

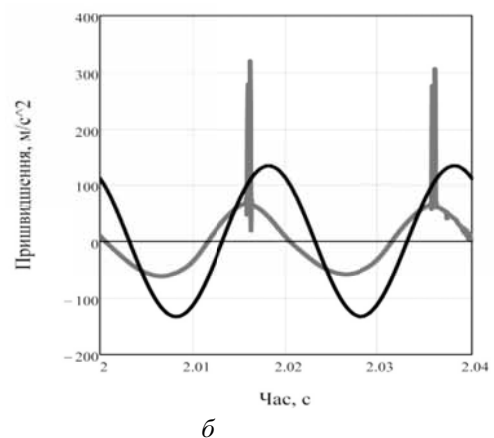
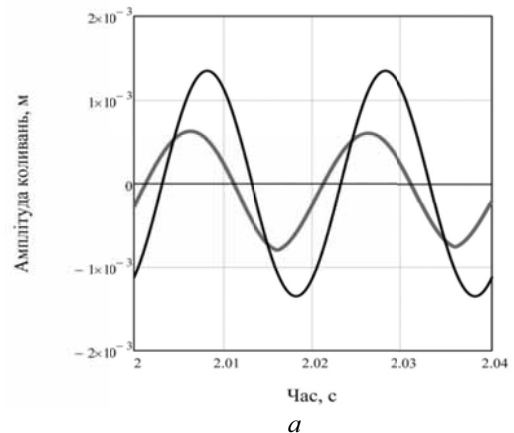


Рис. 4. Часові залежності коливань (а) та пришвидшень (б) вібраційної системи: 1 – традиційної; 2 – запропонованої

Відтворення досліджуваного закону зміни пришвидшення робочого органа за рядом Фур'є зі встановленим числом гармонік $N = 40$ здійснюється на основі виразу

$$Z(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_i z_i \cdot \sin(i\omega t + \phi_i)$$

та представлено на рис. 6.

Відношення суми діючих значень пришвидшень робочих органів за період коливань є критерієм підвищення технологічної ефективності машини (за пришвидшенням)

$$E_a = \sum_i \frac{|z_i|}{|\tilde{z}_i|} \quad (7)$$

Реалізована нелінійна вібраційна машина з імпульсним збуренням є ефективнішою за традиційну гармонійну машину за критерієм (7) у $E_a = 2,195$ рази.

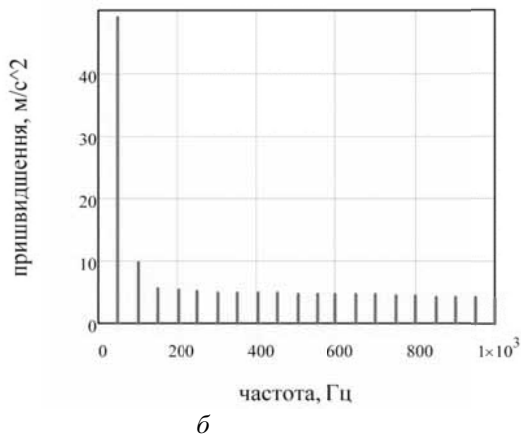
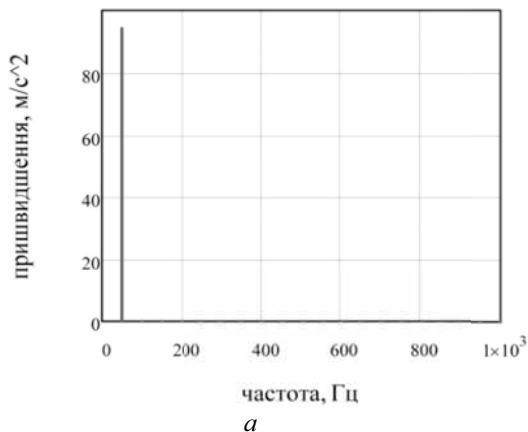


Рис. 5. Спектри діючих значень пришвидшень традиційної (а) та запропонованої (б) вібраційної системи

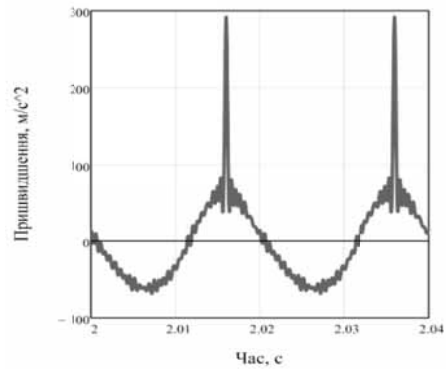


Рис. 6. Пришвидження робочого органа нелінійної вібраційної системи за коефіцієнтами ряду Фур'є

Відповідно, проведено порівняльний аналіз роботи вібраційної системи з кусково-лінійною пружною характеристикою в умовах гармонійного збурення (5) та отримано значення відповідного критерію ефективності діючих значень пришвидшень – $E_a = 1,239$ рази.

Для встановлення величини енергоспоживання користуємося діючими значеннями потужностей, необхідних на приведення в рух механічних систем з ЕМВ

$$P = \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \left[F(t) \left(\frac{d}{dt} y_1(t) - \frac{d}{dt} y_2(t) \right) \right]^2 dt} ;$$

$$\tilde{P} = \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \left[\tilde{F}(t) \left(\frac{d}{dt} \tilde{y}_1(t) - \frac{d}{dt} \tilde{y}_2(t) \right) \right]^2 dt} .$$

На базі відношення діючих значень потужностей матимемо відносний критерій енергетичної ефективності систем

$$E_p = \frac{\tilde{P}}{P} \quad (8)$$

Для розглянутих вібраційних систем діючі значення споживаних потужностей становлять, відповідно, $\tilde{P} = 2,814 \text{ кВт}$ і $P = 1,377 \text{ кВт}$, а тому двочастотна резонансна машина при імпульсному збуренні (при одноктній схемі вмикання ЕМВ) енергоощадливіша у $E_p = 2,04$ рази (за рахунок меншої відносної швидкості руху мас) від типової одночастотної машини з гармонійним рухом (при двоктній схемі вмикання ЕМВ).

Проведені дослідження вказують на можливість підвищення технологічної ефективності типових резонансних одночастотних машин використанням асиметричних кусково-лінійних пружних характеристик при імпульсному збуренні системи, що породжують енергоощадні режими роботи з ударним

пришвидшенням. Амплітудно-частотні спектри ударних пришвидшень еквівалентні системам з полічастотними коливаннями з набором вищих гармонік.

Висновки:

1. Синтезовано пружні параметри асиметричної кусково-лінійної характеристики для реалізації двочастотних резонансних режимів роботи двомасових вібраційних машин з імпульсним електромагнітним збудженням.

2. Встановлено наявність ударних пришвидшень у запропонованій вібраційній двомасовій системі з асиметричною кусково-лінійною пружною характеристикою.

3. Уведено критерії для оцінки та обґрунтовано технологічну й енергетичну ефективності запропонованих двочастотних резонансних машин з імпульсним збудженням над відповідними одночастотними системами.

Список літератури / References

1. Ragulskis, K. (1998), "Vibroengineering", *Lietuvos Mokslas. Science and Arts of Lithuania*, LMA, Vilnius, Lithuania.

2. Цыфанский С.Л. Нелинейные и параметрические колебания вибрационных машин технологического назначения / Цыфанский С.Л., Бересневич В.И., Окс А.Б. – Рига.: Зинатне, 1991. – 230 с.

Tsyfanskiy, S.L., Beresnevich, V.I. and Oks, A.B. (1991), *Nelineynye i parametricheskiye kolebaniya vibratsionnykh mashyn tekhnologicheskogo naznacheniya* [Nonlinear and Parametric Vibrations of Technological Vibratory Machines], Zinatne, Riga, Latvia.

3. Прикладная теория управления электромагнитными вибровозбудителями: монография / А.Е. Божко, В.И. Бельх, Е.М. Иванов, К.Б. Мягкохлеб; под ред. А.Е. Божко. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2010. – 320 с.

Bozhko, A.Ye., Belykh, V.I., Ivanov, Ye.M. and Myagkokhleb, K.B. (2010), *Prikladnaya teoriya upravleniya elektromagnitnymi vibrovzbuditelnyami* [Applied Theory of Electromagnetic Vibration Generator Control] Monograph, NTU "KhPI", Kharkov, Ukraine.

4. Гурський В.М. Аналіз електромеханічних характеристик резонансних вібраційних систем / В.М. Гурський, Я.В. Шпак // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні; Український міжвід. наук.-техн. зб. – Львів: НУ "Львівська політехніка", 2011. – Вип. 45. – С. 192–198.

Gursky, V.M. and Shpak, Ya.V. (2011), "Analysis of electromechanics descriptions of the resonance vibratory systems", *Avtomatyzatsiya vyrobnychykh protsesiv u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni*, Vol. 45, pp. 192–198.

5. Булат А.Ф. Влияние поличастотных колебаний просеивающих поверхностей вибрационных грохотов на разделение сыпучих материалов /

А.Ф. Булат, Г.А. Шевченко // Научный вестник НГУ. – Днепропетровск, 2010. – № 4. – С. 92–97.

Bulat, A.F. and Shevchenko, G.A. (2010), "Influence of poly-frequency vibrations of sifting surfaces of vibratory screens on the division of friable materials", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no.4, pp. 92–97.

6. Надутый В.П. Определение динамических параметров грохота с виброударным возбуждением просеивающей поверхности / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин, В.П. Краснопер // Науч.-техн. журнал НГА Украины „Научовий вісник“ – Днепропетровск, 1998. – Вып. № 3. – С. 73–75.

Naduty, V.P., Lapshin, Ye.S. and Krasnoper, V.P. (1998), "Determination of dynamic parameters of screen with vibroimpulsive motion of sifting surface", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no.3, pp. 73–75.

7. Назаренко І. Теоретичні основи вібростем з цілеспрямованим використанням резонансного режиму руху / І. Назаренко, А. Свідерський, М. Ручинський // Машинознавство. – 2009. – №8 (146). – С. 38–42.

Nazarenko, I., Sviderskiy, A. and Ruchinskiy, M. (2009), "Theoretic bases of the vibrosystems with the purposeful use of the resonance mode of motion", *Mashynoznavstvo*, no.8(146), pp. 38–42.

8. Назаренко І.І. Використання електромагнітних вібраторів на змінному струмі в ударно-вібраційних системах / І.І. Назаренко, Ю.О. Баранов, Т.Ф. Щербина // Теорія і практика будівництва. Збірник наукових праць. – 2007. – Вип. 3.

Nazarenko, I.I., Baranov, Yu.O. and Scherbina, T.F. (2007), "Application of electromagnetic vibrators with alternating current in the vibroimpulsive systems", *Teoria i praktyka budivnytstva*, Vol. 3.

9. Awrejcewicz, J., Andrianov, I.V. and Manevitch, L.I. (1998), "Asymptotic approaches in nonlinear dynamics: New Trends and Applications", *Springer*.

Цель. Повышение технологической эффективности двухмассовых вибрационных одночастотных резонансных машин путем переводом их в нелинейные системы, в частности реализацией асимметричной кусочно-линейной упругой характеристики.

Методика. Заключається в численному моделюванні і порівняльному аналізі діючих значень прискорень робочих органів двомасових вібраційних машин з лінійними і кусочно-лінійними упругими характеристиками. При цьому раціональним оказалось використання імпульсного електромагнітного возмущення при однократної схемі живлення. Змінне тягове зусилля однократної електромагніта трактується на основі ряду Фур'є полічастотним, под гармоніки которого синтезуються упругі асиметричні кусочно-лінійні параметри вібраційної системи.

Результаты. Синтезированы упругие параметры асимметричной кусочно-линейной характеристики для реализации двухчастотных резонансных режимов работы двухмассовых вибрационных машин с импульсным электромагнитным возмущением. Численным моделированием вибрационных систем получены временные зависимости перемещений и ускорений масс, проведен спектральный анализ полученных характеристик. Установлено наличие ударных ускорений в предложенной вибрационной двухмассовой системе с асимметричной кусочно-линейной упругой характеристикой. Введены критерии для оценки технологической и энергетической эффективности предложенных двухчастотных резонансных машин с импульсным возмущением и обоснованы их преимущества над соответствующими одночастотными системами. Технологическая эффективность нелинейных систем подтверждена за счет реализации режимов работы с ударными ускорениями, суммарные действующие значения которых в течение периода преобладают над соответствующими значениями в линейных системах. Для установления величины энергопотребления использовались действующие значения мощностей, необходимые для приведения в движение механических систем.

Научная новизна. Заключается в последующем развитии нелинейных вибрационных машин с электромагнитным возмущением. В частности, впервые апробирован механизм реализации асимметричных резонансных режимов работы двухмассовых вибрационных систем с синтезированными кусочно-линейными упругими характеристиками с учетом особенностей импульсного электромагнитного возмущения.

Практическая значимость. Внедрением в структуру двухмассовой вибрационной системы асимметричных кусочно-линейных упругих характеристик и использованием импульсного возмущения повышается технологическая и энергетическая эффективность базовых линейных одночастотных машин.

Ключевые слова: *резонансная вибрационная машина, кусочно-линейная упругая характеристика, электромагнитный привод, импульсное возмущение, ударные ускорения*

Purpose. Increase of technological efficiency of the two-mass one-frequency resonant vibration machine by means of transfer in the nonlinear systems, in particular by realization of asymmetric elastic piecewise linear characteristic.

Methodology. Numerical simulation and comparative analysis of real values of acceleration of operating elements of the two-mass vibratory machines with linear and elastic piecewise linear characteristic have been carried out. Application of pulse electromagnetic disturbance single-phase power circuit appeared rational. The variable pulling pressure of single-phase electromagnet was interpreted on the base of Fourier series as poly-frequency. The asymmetric elastic piecewise linear characteristics of the vibratory machine were synthesized according to its harmonics.

Findings. The asymmetric elastic piecewise linear characteristics have been synthesized for realization of the two-frequency resonant operation modes of the two-mass vibratory machines with pulse electromagnetic disturbance. Using the numerical simulation of the vibratory systems we have obtained time dependences of moving and acceleration of the masses. The spectral analysis of the received characteristics has been carried out. The presence of shock accelerations in the offered two-mass vibration machine with asymmetric elastic piecewise linear characteristic has been proved. The estimation criteria have been formulated and the technological and power advantages of the offered two-frequency resonance machines with pulse disturbance over the one-frequency systems. Technological efficiency of the nonlinear systems is confirmed by realization of shock acceleration operation modes. The total real values of shock acceleration during certain period of time prevail above the values in the linear systems. To calculate the energy consumption we have used the power values required to set in motion the mechanical systems.

Originality. We have contributed in further development of nonlinear vibratory machines with electromagnetic disturbance. For the first time we tested the mechanism of realization of the asymmetric resonance operation modes of the two-mass vibratory systems with the synthesized elastic piecewise linear characteristic taking into account the features of pulse electromagnetic disturbance.

Practical value. Technological and power efficiency of basic linear one-frequency machines rises due to implementation into their structure of the two-mass vibratory systems with asymmetric elastic piecewise linear characteristics and use of pulse disturbance.

Keywords: *resonant vibration machine, piecewise linear characteristic, electromagnetic drive, pulse disturbance, shock acceleration*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук І.Є. Грицаєм. Дата надходження рукопису 05.12.12.