

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІМПУЛЬСНИХ РЕЗОНАНСНИХ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН

Володимир Гурський, Олексій Ланець, Ярослав Шпак

Національний університет «Львівська політехніка»,
79013, вул. Степана Бандери, 12, Львів, Україна, e-mail: akm@polynet.lviv.ua

COMPARATIVE EVALUATION OF THE EFFECIENTY OF IMPULSIVE RESONANCE VIBRATORY MACHINES

Volodymyr Gursky, Oleksiy Lanets, Yaroslav Shpak

Lviv Polytechnic National University,
79013, Bandera street, 12, Lviv, Ukraine, e-mail: akm@polynet.lviv.ua

АНОТАЦІЯ. В статті розглянуто порівняльну оцінку ефективності функціонування лінійних та віброударних резонансних вібраційних машин з імпульсним електромагнітним збудженням. Запропоновано модель руху системи, що враховує рівняння електромагнітного контуру на базі ідеальної вольт-амперної характеристики діода. Вплив середовища враховано коефіцієнтами приведення за масою та коефіцієнтом в'язкого тертя. Введено два технологічних та два енергетичних критерії для відносної оцінки якості роботи машин. Встановлено вплив на кількісні показники ефективності функціонування віброударних машин оптимізаційного характеру синтезуючого параметра для відповідних часткових критеріїв.

Ключові слова: віброударна машина, електромагнітний привід, пружна характеристика, імпульсне збудження, резонансна система.

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрена сравнительная оценка эффективности функционирования линейных и виброударных резонансных вибрационных машин с импульсным электромагнитным возмущением. Предложена модель движения системы, учитывающая уравнение электромагнитного контура на основе идеальной вольтамперной характеристики диода. Влияние среды учтено коэффициентами приведения по массе и коэффициентом вязкого трения. Введены два технологических и два энергетических критерии относительной оценки качества работы машин. Установлено влияние на количественные показатели эффективности функционирования виброударных машин оптимизационного характера синтезирующего параметра для соответствующих частных критериев.

Ключевые слова: виброударная машина, электромагнитный привод, упругая характеристика, импульсное возбуждение, резонансная система.

ABSTRACT. Purpose. Technological and energy efficiency resonant linear and vibro-impact machines with an impulsive electromagnetic drive is compared by multi-criteria evaluation. Selection of optimal machine provided by the synthesis of asymmetric piecewise-linear elastic characteristics, including resiliency limiter vibrations. **Methodology/approach.** The synthesis is based on the variable dynamic analysis of machines and on the numerical solution of systems of nonlinear partial differential equations. **Findings.** Patterns of change of the established indicators of efficiency are set by the synthesis parameter. Optimal vibro-impact machines are synthesized for the values of the respective quality indicators. **Research limitations/implications.** Based assessment of the quality of work of vibrating machines of various classes (non-linear and linear) was introduced. Regularity indicators of technological and energy efficiency is based on parametric synthesis and dynamic analysis. **Originality/value.** Grounded approach to parametric conversion of elastic characteristics of linear resonance machines in order to increase the efficiency of its functioning.

Key words: vibro-impact machine, electromagnetic drive, resilient description, criteria of optimization, resonance system.

ВСТУП

В багатьох традиційних галузях виробництва домінують високоефективні віброударні технологічні машини, робота яких базуються на складних фізико-механічних властивостях оброблюваних середовищ [1–5]. Зважаючи на ряд тенденцій та стратегій розвитку технологій і засобів їхньої

реалізації, напрямки подальших досліджень зводяться до вивчення і впровадження резонансних явищ і систем. Це спонукає не тільки до адаптації існуючих резонансних машин під нові, більш жорсткі технологічні вимоги, але й обґрунтованого виконання машин з новими конструктивними параметрами.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Моделі віброударних машин відносяться до класу суттєво-нелінійних систем. З врахуванням динаміки привода вони можуть бути якісно досліджені обчислювальними методами. За формування віброударного режиму з відповідними кінематичними характеристиками відповідають інерційні, пружно-дисипативні та силові параметри системи. Визначення ж раціональних (оптимальних) пружно-силових параметрів віброударних систем повинно базуватися на відповідному динамічному аналізі з врахуванням критеріїв оцінки та з обмеженнями на зміну умов роботи. Слід зазначити, що питання якості реалізації машини варто трактувати комплексним аналізом, що здійснюється на відповідній моделі машини. В результаті перевага надається варіанту машини з кращими технологічними й енергетичними показниками.

ОГЛЯД ПУБЛІКАЦІЙ

Відомо, що однокатні резонансні машини з електромагнітним приводом та лінійними пружними зв'язками мають слабо виражені нелінійні властивості, зумовлені основним чином параметричним зв'язком між зусиллям збуренням та переміщенням коливальних мас [6]. Прикладні дослідження віброударних режимів свідчать про принциповість параметрів і структури пружного зв'язків у механічній системі [7, 8]. Конструктивні нелінійності кусково-лінійного типу є ефективним засобом реалізації віброударних систем. При цьому їхні динамічні (частотні) особливості залежать від виду та параметрів кусково-лінійної пружної характеристики. Умова резонансу системи є принциповою за використання у якості привода електромагнітних віброзбуджувачів [9, 10]. При цьому слід мати на увазі, що промислові зразки приводів цього типу мають вбудовані в двомасову структуру пружні зв'язки лінійного типу.

МЕТА РОБОТИ

В статті передбачається проведення комплексного порівняльного аналізу гармонійних та віброударних резонансних машин імпульсного типу, реалізованих на базі електромагнітного привода. При цьому такий аналіз пропонується здійснювати шляхом технологічної та енергетичної (з точки зору ефективності функціонування машини) оцінки реалізації відповідно досягнутого режиму. Задача базується на відповідних критеріях якості, що несуть інформацію про кінематичні, динамічні та енергетичні параметри синтезованої машини.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для апробації поставленої задачі вибрано конструкцію гармонійного резонансного високочастотного (100 Гц) вібростолу з переважанням на робочій масі до 12g, розробленого НДЛ-40 (рис. 1). Розміри робочої поверхні 1200×600мм. Спроба переналаштування конструкції у високочастотну віброударну систему шляхом використання нелінійності пружного елемента не дала позитивних результатів. Тому розглядається задача щодо реалізації віброударної машини із частотою збурення коливань 50Гц для можливості ущільнення помірно жорсткої суміші з наступними характеристиками:

$$\rho = 2000 \text{ кг} / \text{м}^3, \\ S = 0,8 \times 0,3 \text{ м}, h = 0,250 \text{ м}.$$

За відомих інерційних параметрів обох коливальних мас $m_1 = 207 \text{ кг}$ та $m_2 = 161 \text{ кг}$ синтезу підлягає асиметрична пружна характеристика, визначена коефіцієнтами пружності c_1 та c_2 . Асиметричну білінійну пружну характеристику коливальної системи (рис. 2) можна представити у вигляді

$$R[x(t)] = \begin{cases} c_1 \cdot x(t), & x(t) \geq 0; \\ c_2 \cdot x(t), & x(t) < 0, \end{cases} \quad (1)$$

де c_1 – параметр пружності верхньої пружини, а c_2 визначається із врахуванням пружності верхньої та нижньої пружини.



Рис. 1. Видгляд вібраційного стола з електромагнітним приводом

Fig. 1. A view of vibratory table with an electromagnetic drive

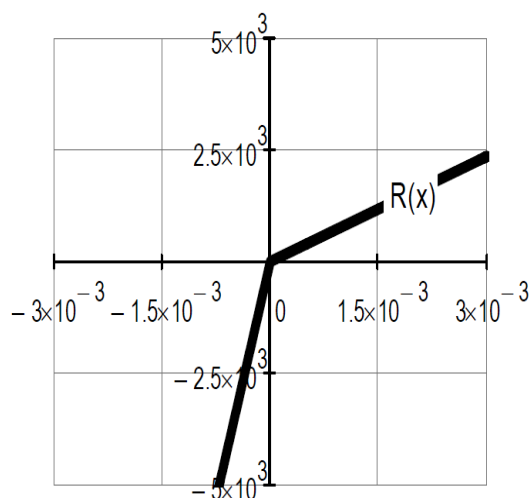


Рис. 2. Асиметрична кусково-лінійна пружна характеристика системи

Fig. 2. Asymmetric cobbed-linear resilient description of the system

Спрощена модель електромагнітної віброударної машини з імпульсним збуренням побудована на базі ідеалізованої вольт-амперної характеристики випрямляча та з врахуванням технологічного середовища зведеними коефіцієнтами впливу, що визначені на підставі вивчення хвильових процесів у будівельних сумішах під час їхнього віброущільнення [11]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\mu_0 S w^2}{2(\delta_0 - (x_1(t) - x_2(t)))} \cdot i(t) + \left[r + \begin{cases} r^{<+>, \text{ якщо } i(t) \geq 0 \\ r^{<->, \text{ якщо } i(t) < 0 \end{cases} + \frac{\mu_0 S w^2 \cdot (\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t))}{2(\delta_0 - (x_1(t) - x_2(t)))^2} \right] \cdot i(t) = U_0 \sin(\omega t); \\ [m_1 + a \cdot m_{\text{заб}}] \ddot{x}_1(t) + d \cdot \omega \cdot m_{\text{заб}} \cdot \dot{x}_1(t) + c_{\text{із}} \cdot x_1(t) + \\ + b \cdot (\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t)) + \begin{cases} c_1 \cdot (x_1(t) - x_2(t)), \\ \text{якщо } x_1(t) - x_2(t) \geq 0 \\ c_2 \cdot (x_1(t) - x_2(t)), \\ \text{якщо } x_1(t) - x_2(t) < 0 \end{cases} = \frac{\mu_0 S w^2 \cdot n}{4} \left[\frac{i(t)}{\delta_0 - (x_1(t) - x_2(t))} \right]^2; \\ m_2 \ddot{x}_2(t) - b \cdot (\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t)) - \begin{cases} c_1 \cdot (x_1(t) - x_2(t)), \\ \text{якщо } x_1(t) - x_2(t) \geq 0 \\ c_2 \cdot (x_1(t) - x_2(t)), \\ \text{якщо } x_1(t) - x_2(t) < 0 \end{cases} = -\frac{\mu_0 S w^2 \cdot n}{4} \left[\frac{i(t)}{\delta_0 - (x_1(t) - x_2(t))} \right]^2. \end{array} \right. \quad (2)$$

Позначення параметрів: магнітна проникливість повітря $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$; число витків котушки $w = 640$; площа поверхні полюсів магніту $S = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; активний опір котушки $r = 1 \text{ Ом}$; опір діода в прямому $r^{<+>} = 0,001 \text{ Ом}$ та зворотному

$r^{<->} = 10^8 \text{ Ом}$ напрямках; номінальне значення повітряного проміжку $\delta_0 = 0,0022 \text{ м}$; кількість паралельно працюючих електромагнітів $n = 8$; частота збурення $\omega = 314 \text{ рад/с}$; номінальне значення напруги $U_0 = 220\sqrt{2} \text{ В}$; $a = -0,24$,

$d = 1,25$ – хвильові коефіцієнти впливу бетоносуміші на колювання робочого органа [11]; $b = 2 \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \zeta \omega$ – фактор дисипації машини, зокрема коефіцієнт в'язкого тертя коливальної системи; ζ – параметр загасання (безрозмірний коефіцієнт демпфування) приведеної резонансної системи як частка величини критичного загасання для даної системи, $\zeta = 0,15$.

Синтезовані пружні параметри визначатимуться за співвідношеннями, що визначають структуру вибраної пружної характеристики та частотні властивості машини:

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot \omega_{01}^2, \\ c_2 &= \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot \omega_{02}^2, \end{aligned} \quad (3)$$

де $\omega_{01} = \frac{\omega}{z}$; $\omega_{02} = \Lambda \cdot \omega_{01} = \Lambda \cdot \frac{\omega}{z}$ – закладені значення власних частот колювань за значеннями пружних коефіцієнтів; z – резонансне налагодження, $z = 0,94$; Λ – відношення власних частот, за яким встановлюється співвідношення між коефіцієнтами пружності:

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot \left(\frac{\omega}{z} \right)^2; \\ c_2(\Lambda) &= \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot \left(\Lambda \cdot \frac{\omega}{z} \right)^2; \quad (4) \\ c_2(\Lambda) / c_1 &= \Lambda^2. \end{aligned}$$

Для беззорової пружної характеристики значення власної частоти колювань буде фіксованим [7, 8]

$$\Omega_0(\Lambda) = \frac{2\omega_{01}\omega_{02}}{\omega_{01} + \omega_{02}} = \frac{2\Lambda \omega}{\Lambda + 1 z}. \quad (5)$$

Синтез за одним параметром побудований за принципом застосування традиційних гармонійних машин та пружного зв'язку між коливальними масами. Реаліза-

ція віброударних машин може здійснюватися на базовій резонансній машини застосуванням пружних обмежувачів руху мас та упорів для зміни пружної характеристики системи за напрямком руху, протилежному від розташування робочої маси.

Основу подальшого аналізу прийнято здійснювати на основі цілісного підходу до машини з врахуванням її технологічних та енергетичних можливостей [12]. Зокрема, за ключовий кінематичний параметр прийнято прискорення робочої маси, а саме максимальне значення $a_{1\max}$ та коефіцієнт асиметрії прискорення k_a , що є першим технологічним критерієм, який встановлює наявність віброударного режиму з певним характером полічастотності режиму [4].

$$k_a(\Lambda) = a_{1\max} / |a_{1\min}|, \quad (6)$$

де $a_{1\max}$, $a_{1\min}$ – максимальне у додатній області та мінімальне у від'ємній області значення прискорення робочої маси).

Орієнтовне значення ширини резонансної зони є наступним технологічним критерієм стійкості:

$$\Delta f(\Lambda) = \left[\frac{2\Lambda}{z(\Lambda + 1)} - 1 \right] \cdot \frac{\omega}{2\pi}. \quad (7)$$

На базі максимуму прискорення введено наступний – енергетичний критерій оцінки якості реалізації відповідного кінематичного показника

$$\xi_a(\Lambda) = \frac{a_{1\max}}{stdev[p(t)]}, \quad (8)$$

де $stdev[p(t)]$ – діюче значення споживаної потужності системи, $p(t) = n \cdot u(t) \cdot i(t)$.

Наступним енергетичним показником якості вважається ККД технологічної машини, оскільки модель (2) несе інформацію про енергетичні показники електромагнітного привода

$$\eta(\Lambda) = \frac{\text{mean}[2 \text{pdt}(t)]}{\% \cdot \text{mean}[p(t)]}, \quad (9)$$

$$\xi_r(\Lambda) = 0,5 \left[\frac{k_a(\Lambda)}{k_a(1)} + \frac{\Delta f(\Lambda)}{\Delta f(1)} \right], \quad (10)$$

де $\text{pdt}(t)$ – середнє значення потужності технологічних втрат,

$$\text{pdt}(t) = \frac{1}{2} (d \cdot \omega \cdot m_{\text{зав}} \cdot \dot{x}_1(t)^2); \text{mean}[p(t)] - \text{середнє значення споживаної потужності.}$$

Реалізована задача синтезу за одним параметром пружності дає підстави стверджувати про визначальну технологічну та енергетичну переваги віброударної системи над лінійним взірцем (коли $\Lambda = 1$). При цьому ряд показників (рис. 3, 4) визначаються оптимальними залежностями відповідно до сутності критерію.

Показники (6) та (7) формують середнє значення узагальненого технологічного критерію, а показники (8) та (9) – енергетичного:

де в знаменнику – показники для базової лінійної моделі.

Технологічні показники (рис. 5, а) віброударної системи (відносно лінійної) переважають її енергетичні показники ефективності.

В цілому залежно від технологічних умов для вібраційної системи можна встановити відповідну оптимальну пружну характеристику.

Часові залежності прискорення робочої маси лінійної та віброударної системи за оптимальних показників k_a , ξ_a (при $\Lambda = 6$) мають типовий для машин даного класу вигляд (рис. 5, б).

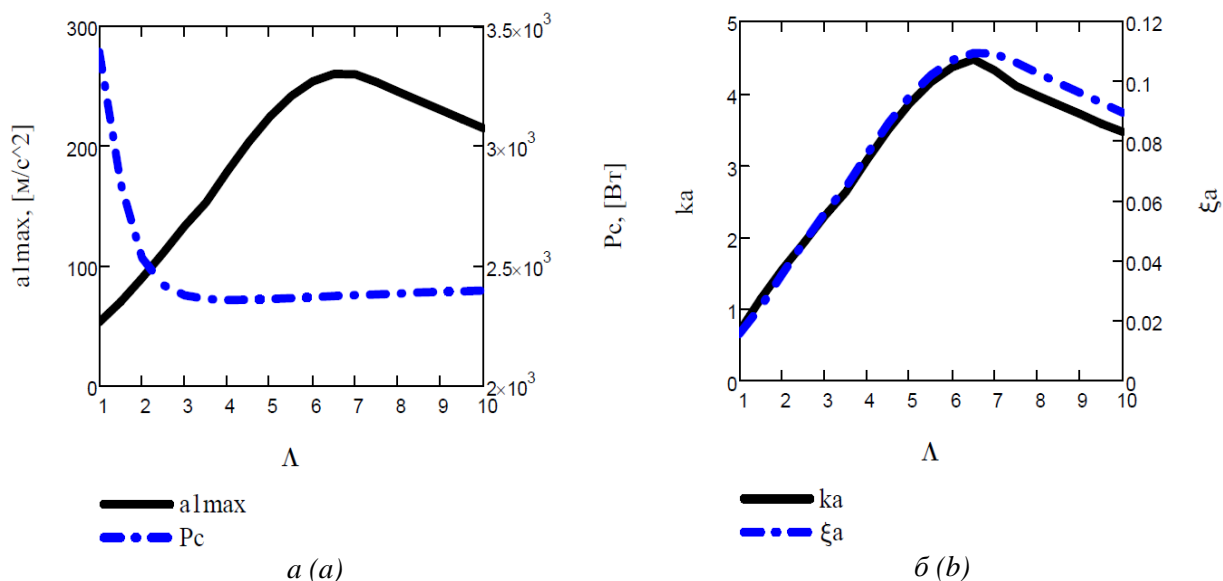


Рис. 3. Вплив синтезуючого параметра на кінематичні і енергетичні параметри (а) та показники роботи машин (б)

Fig. 3. Graphic dependences of the synthesis parameter to the kinematics, power parameters (a) and criteria's of worked machine (b)

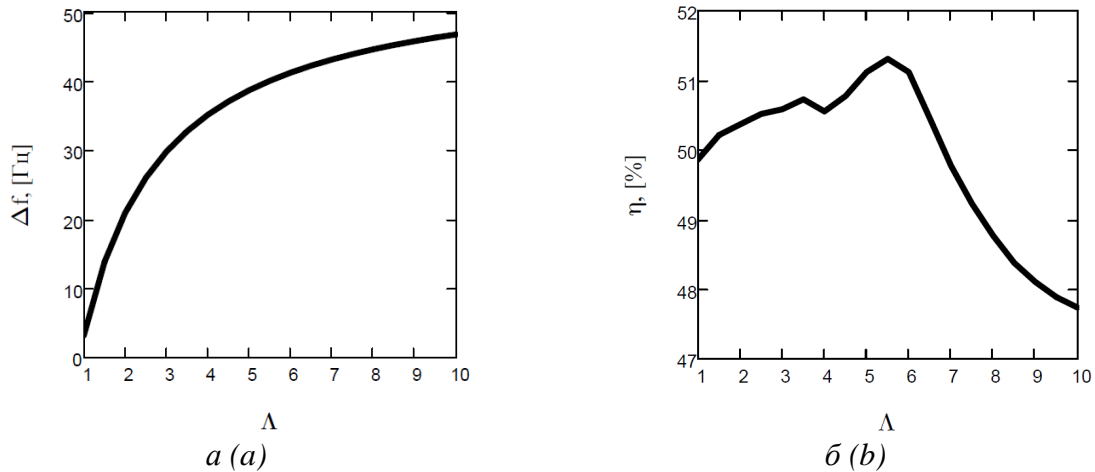


Рис. 4. Залежності ширини резонансної зони (*a*) і ККД технологічної машини (*b*) від синтезуючого параметра

Fig. 4. Dependence of the resonance zone width (*a*) and efficiency coefficient (*b*) of the technological machine from synthesis parameter

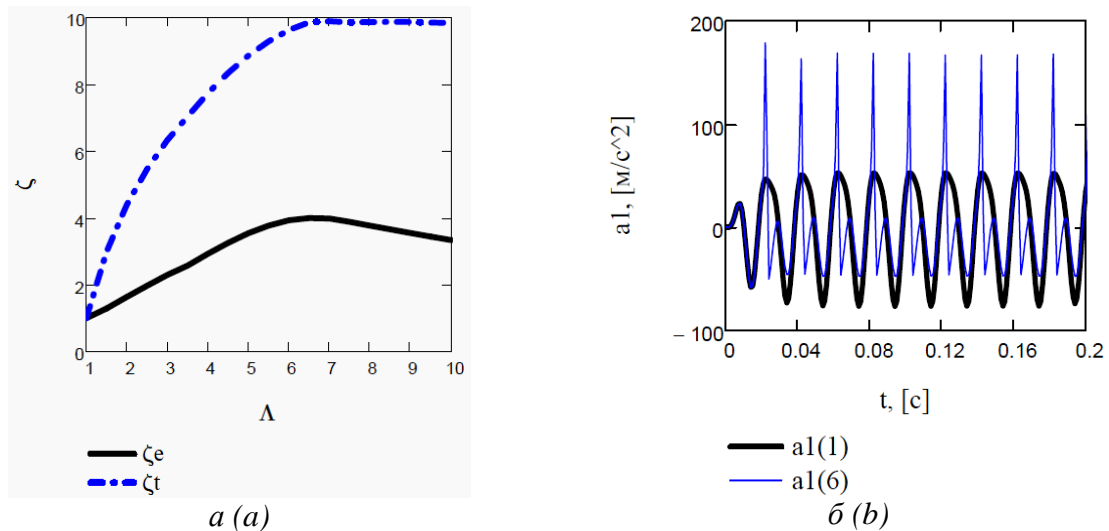


Рис. 5. Залежності технологічних і енергетичних критеріїв від синтезованого параметра (*a*) та часові залежності прискорення робочої маси лінійної та оптимальної віброударної машини (*b*)

Fig. 5. Dependence of technological and energy criteria's from synthesis parameter (*a*) and sentinel dependence of acceleration of working mass of the linear and optimal vibro-impact machine (*b*)

ВИСНОВКИ

1. Запроваджено багатокритеріальну оцінку якості функціонування резонансних вібраційних машин, що враховує основні показники роботи машин: технологічні – ширину резонансної зони, коефіцієнт асиметрії прискорення робочої маси та енергетичні – ККД та відношення максимуму прискорення робочої маси до споживаної потужності.

2. Дослідження здійснено на системі нелінійних диференціальних рівнянь, що опи-

сує коливальні процеси в навантажених лінійній та віброударній машинах з імпульсним електромагнітним приводом.

3. Встановлено вплив синтезуючого параметра – зведеного коефіцієнта на основні часткові критерії оцінки, на підставі чого визначено показники відносної ефективності та оптимальні параметри віброударних машин над лінійними: за технологічними показниками – 9,8 при $\Lambda = 7$, за енергетичними показниками – 4 при $\Lambda = 6,5$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гончаревич И.Ф. О повышении производительности и рентабельности промышленных нанотехнологий // Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал. – № 3, 2009. – С. 36-49.
2. Виброударное упрочнение / Ю.Р. Копылов. Воронеж: Изд-во ВГТУ, – 1999. 384 с.
3. Потураев В.Н., Франчук В.П., Надутый В.П. Вибрационная техника и технологии в энергоемких производствах: Монография. – Днепропетровск, 2002. – 190 с.
4. Назаренко И.И. Прикладные задачи теории вибрационных систем: Учебное пособие. – К.: ИСИО, 1993. – 216 с.
5. Stevanović-Hedrih K., Jović S. Models of technological processes on the basis of vibro-impact dynamics // Scientific Technical Review, Vol.LIX, No.2, 2009. – P. 51–72.
6. Низкочастотные электровибрационные машины / М. В. Хвингия, М. М. Тедошвили, И. А. Питимашвили и др.; под ред. К. М. Рагульскиса. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 95 с.: ил.
7. Казакевич М.И. Избранное: монография / М.И. Казакевич. – Днепропетровск, 2009. – 524 с.
8. Човнюк Ю.В. Моделі коливачь суттєво-нелінійних систем ґрунтообробних робочих органів / Ю.В. Човнюк, Ю.О. Гуменюк, Г.А. Герасимчук // Міжвузівський збірник “Наукові нотатки”. – Луцьк, 2011. – Вип. № 32 – С. 462-468.
9. Божко А.Е. Функциональные структуры электромагнитных виброударных систем / А.Е. Божко, В.И. Белых и др. // Ж.: "Проблемы машиностроения", Т.11, № 5-6, 2008 г.
10. Басараб В.А. Дослідження полічастотного режиму коливачь робочого органу електромагнітної ударно-вібраційної системи / В.А. Басараб // Науково-технічний журнал Київського національного університету будівництва і архітектури «Техніка будівництва», вип. 29/2012. – К.: «МП Леся», 2012. С. 50–57.
11. Назаренко И.И. Вібраційні машини і процеси будівельної індустрії / И.И. Назаренко. – К.: КНУБА, 2007. – 203с.
12. Гурський В.М. Багатокритеріальний аналіз резонансних віброударних систем з імпульсним електромагнітним приводом/ В.М. Гурський // Автоматизація виробничих про-

цесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2014. - Вип. 48. – С. 74-86.

REFERENCES

1. Goncharevich I.F., 2009. O povyshenii proizvoditel'nosti i rentabel'nosti promyshlennyh nanotekhnologij [About the performance and efficiency increase for industrial nanotechnologies]. Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyj Internet-zhurnal [Nanotechnologies in construction: a scientific Internet-journal], Vol.3, 36-49. – (in Russian)
2. Kopylov Ju.R., 1999. Vibroudarnoe uprochnenie [Vibro-impact hardening]. Voronezh, VGTU Publ., 384. – (in Russian)
3. Poturaev V.N., Franchuk V.P., Nadutyj V.P., 2002. Vibracionnaja tehnik i tehnologii v jenergoemkih proizvodstvah [Vibration equipment and technologies in energy-intensive industries]. Dnepropetrovsk Publ., 190. – (in Russian)
4. Nazarenko I.I., 1993. Prikladnye zadachi teorii vibracionnyh sistem [Applied problems in the theory of vibratory systems]. Kyiv: ISIO Publ., 216. – (in Russian)
5. Stevanović-Hedrih K., Jović S., 2009. Models of technological processes on the basis of vibro-impact dynamics. Scientific Technical Review, Vol.LIX, No.2, 51-72.
6. Hvingija M.V., Tedoshvili M.M., Pitimashvili I.A., 1989. Nizkochastotnye elektrovibracionnye mashiny [Low-frequency electrovibratory machines]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 95. – (in Russian)
7. Kazakevich M.I., 2009. Izbrannoe [Favorites]. Dnepropetrovsk Publ., 524. – (in Russian)
8. Chovnjuk Ju.V., Gumenjuk Ju.O., Gerasimchuk G.A., 2011. Modeli kolivan' suttevo-nelinijnih sistem rruntoobrobnih robochih organiv [Vibration models of substantially-nonlinear systems ground development working groups]. Mizhvuzivs'kij zbirnik “Naukovi notatki” [Interuniversity collection “Scientific notes”]. Luc'k Publ., Vol. 32, 462-468. – (in Ukrainian)
9. Bozhko A.E., Belyh V.I., 2008. Funkcional'nye struktury jelektromagnitnyh vibroudarnyh sistem [Functional structure of electromagnetic vibro-impact systems]. Problemy mashinostroenija [Problems of mechanical engineering], Vol.11, No.5-6. – (in Russian)
10. Basarab V.A., 2012. Doslidzhennja polichastotnogo rezhimu kolivan robochogo organu elektromagnitnoї udarno-vibracijnoї sistemi [Research of multy-frequency vibration mode

- of the working body of electromagnetic shock-vibration system]. *Tehnika budivnictva* [Scientific and technical journal Kyiv National University of Construction and Architecture “Engineering construction”]. Kyiv MP Lesja Publ., Vol. 29, 50–57. – (in Ukrainian)
11. *Nazarenko I.I., 2007. Vibracijni mashini i procesi budivel'noï industriï* [Vibrating machines and processes in building industry]. Kyiv KNUBA Publ., 203. – (in Ukrainian)
12. *Gursky V.M., 2014. Bagatokriterial'nij analiz rezonansnih vibroudarnih sistem z impul'snim elektromagnitnim privodom* [Multicriterion analysis of resonant vibro-impact systems with an impulse electromagnetic drive]. *Avtomatizacija virobnychih procesiv u mashinobuduvanni ta priladobuduvanni* [Automation of production processes in mechanical engineering and instrument]. Vol.48, 74-86. – (in Ukrainian)