

З.А. Стоцько, Б.І. Сокіл\*, В.Г. Топільницький, Д.П. Ребот  
 Національний університет “Львівська політехніка”,  
 кафедра електронного машинобудування,  
 \*Академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного,  
 кафедра електромеханіки

## РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДУ РЕЗОНАНСНОГО ВІБРАЦІЙНОГО СЕПАРАТОРА

**Проведено розрахунок приводу резонансного вібраційного сепаратора з горизонтальним збуренням коливань сит. За допомогою використання критерію оптимальності процесу вібросепарації наведено співвідношення для визначення частоти обертання дебалансу та мінімальної потужності електромотора вібраційного сепаратора.**

**Calculations concerning the resonance vibratory separator with horizontal vibration disturbance sieves are conducted. Correlation to determine the rotation frequency of unbalance and minimal electric motor power of a vibrating separator is presented using the criterion of the optimization of the process of vibro-separation. The characteristics of a vibratory separator drive are defined.**

**Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень.** Вібросепарація використовується для розділення багатокомпонентних сипких сумішей на фракції за величиною, масою, поверхневими властивостями їх частинок тощо. Перевагою такого методу є інтенсифікація технологічного процесу. Одночасно перевагами вібросепараторів є те, що вони забезпечують у широкому діапазоні зміни частоти та амплітуди коливань робочого органа (а відповідно і різноманітні режими сепарації); збільшують порівняно з іншими сепараторами віддачу енергії в оброблюване середовище, підвищуючи ефективність процесу сепарації; дозволяють під час сепарування змінювати не лише інтенсивність вібраційної дії на середовище, що сепарується, а й структуру вібраційного силового поля, що діє на нього.

Вібросепаратори відрізняються простотою конструкції і можливістю узгодження частоти та амплітуди коливання приводу, що гарантує найточнішу гранулометрію тонкого та товстого сортування під час сепарації. Найбільшою ефективністю характеризуються рухомі вібросепаратори. Вони поділяються на такі типи:

- інерційні сепаратори;
- інерційно–самобалансні сепаратори;
- резонансні сепаратори;
- зарезонансні сепаратори.

Відкрита конструкція вібросепараторів забезпечує легкий доступ до сит та сприяє швидкій їх заміні. Вібраційні сепаратори порівняно з іншими сортувальними пристроями забезпечують вищу продуктивність та чіткість розділення за менших витрат електроенергії завдяки тому, що під час вібрування шар середовища на ситі інтенсивно розрихлюється, зменшується тертя між частинками, вони стають рухомішими, що зумовлює відносний перерозподіл їх величини та прискорює виділення прохідних частинок.

За видами основного робочого органа або середовища визначено перспективні типи існуючих вібраційних сепараторів або таких, які перебувають у процесі розроблення вібросепараторів. Класифікаційні схеми вібросепараторів за типом руху та за видами основного робочого органа показано на рис. 1 та 2.

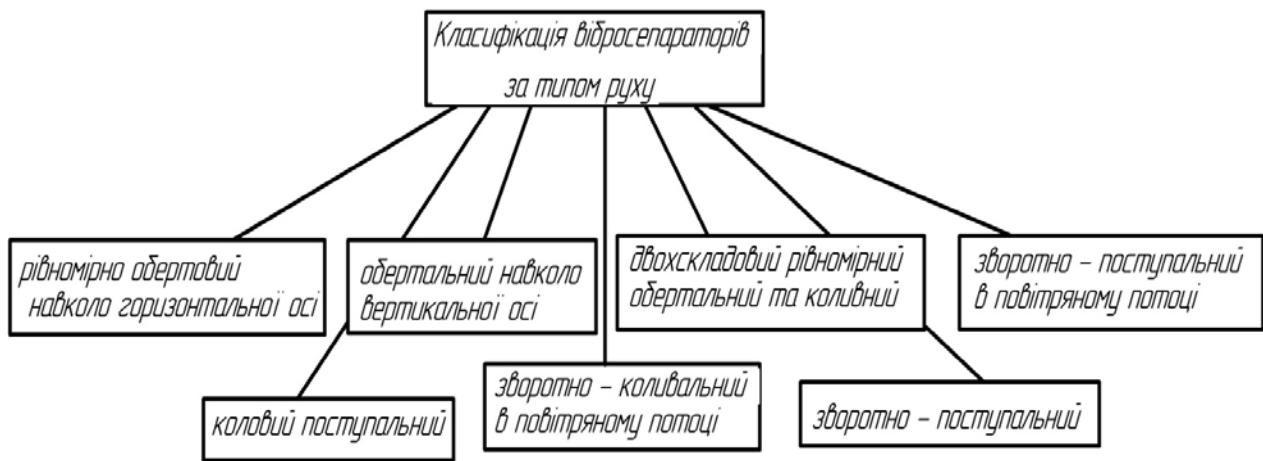


Рис. 1. Класифікація вібросепараторів за типом руху робочого контейнера

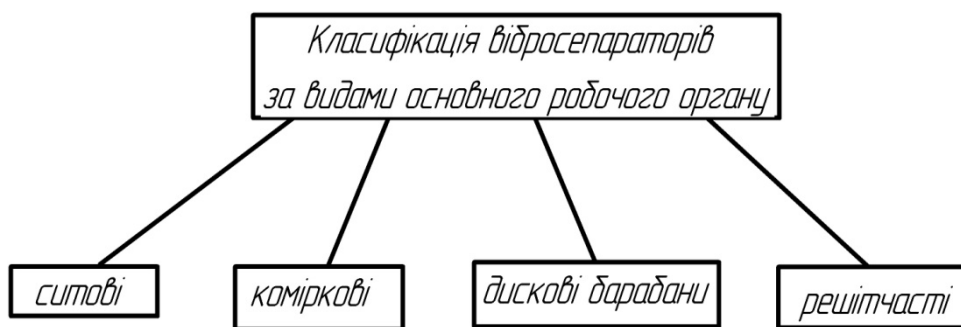


Рис. 2. Класифікація вібросепараторів за видами основного робочого органу

Вібраційні сепаратори за принциповою динамічною будовою та конструктивною схемою переважно подібні до вібраційних живильників та конвеєрів. Основна їх відмінність у конструкції робочого органу: у вібраційних сепараторах застосовуються корпуси з ситами, колосниковими та струнними решітками, а їх робочий орган найчастіше встановлюється похило.

На рис. 3 показано принципіві схеми вібраційних сепараторів. Зокрема, на рис. 3, а та б показано принципіві схеми вібраційних сепараторів з дебалансним віброзбуджувачем відповідно з одним та двома ситами; на рис. 3, в показано вібросепаратор з мотор-вібратором, що знаходиться під робочим контейнером та двома ситами, що розташовані під певним кутом до горизонту; на рис. 3, г – вібросепаратор з двома мотор-вібраторами, що знаходяться з двох боків робочого контейнера; на рис. 3, д та е показані відповідно вібросепаратор, що знаходиться на рухомій рамі та вібросепаратор на жорстко закріпленій основі з електромагнітними віброзбудниками.

Основні типи інерційних та електромагнітних вібраційних сепараторів та їх характеристики описувались в [1–5]. Сьогодні широко застосовуються в промисловості резонансні вібросепаратори. У конструктивному відношенні вони складніші від вібросепараторів, які працюють у зарезонансній зоні, проте вони характеризуються багатьма експлуатаційними перевагами – високою якістю сепарації, низькою енергомісткістю, експлуатаційною надійністю, відсутністю динамічних навантажень на свою підвіску. До того ж вони потребують вибору характеристик віброзбудника, зокрема, кутової швидкості його обертання, адже він є джерелом виникнення у середовищі, що сепарується, відповідних коливань. До того ж вібраційні сепаратори цього класу використовуються для різних типів сипких середовищ, кожен із яких має свою структуру, свої фізико-механічні властивості, а значить, і свій спектр власних частот коливань. Тому під час їх проектування заздалегідь треба передбачити можливості зміни частоти обертання приводу у широкому діапазоні.

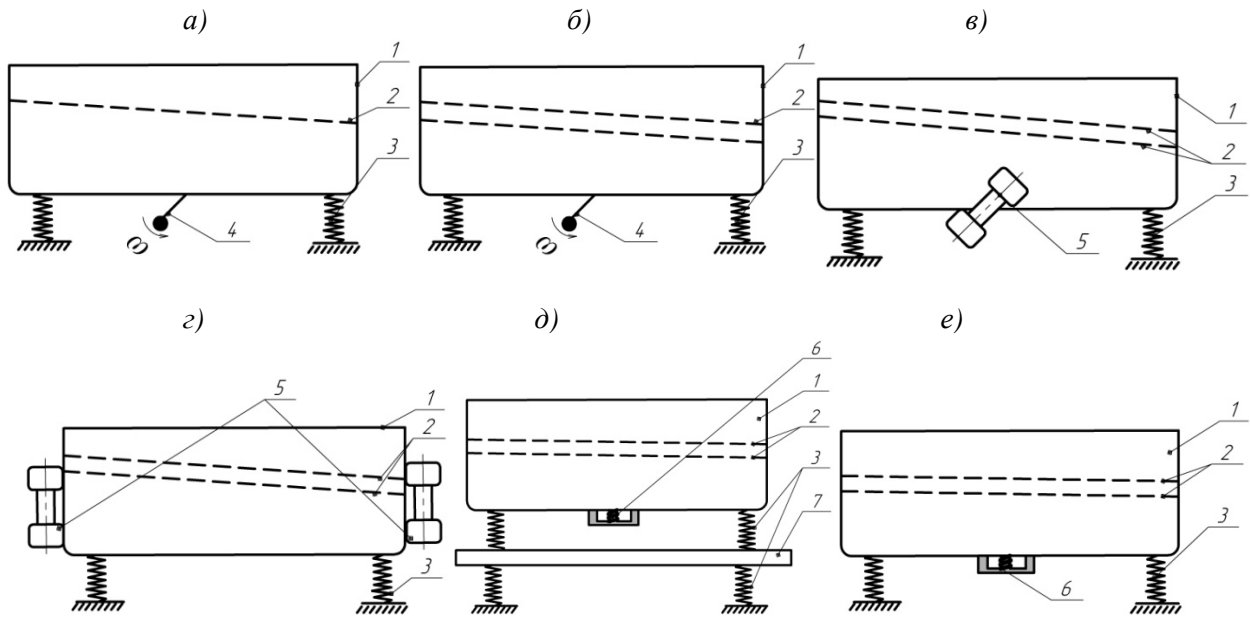


Рис. 3. Принципові схеми вібраційних сепараторів: 1 – корпус вібросепаратора; 2 – сита; 3 – пружини; 4 – дебаланс; 5 – мотор-вібратор; 6 – електромагнітний вібробудник; 7 – рама

Продуктивність та інтенсивність вібросепарації залежить від впливу широкого спектра зовнішніх та внутрішніх чинників на цей процес. Внаслідок цього відбувається складна взаємодія між контейнером вібросепаратора та шаром середовища, що сепарується, зміна динамічних характеристик останнього. Ця взаємодія потребує тривалого та складного вивчення і не є повністю дослідженою. Тому важливим завданням є необхідність глибшого розгляду динамічного процесу вібраційної сепарації, зокрема, завданням зв'язку параметрів середовища, що сепарується, та приводу вібросепаратора. Це питання і є предметом розгляду у цій роботі.

**Постановка задачі досліджень.** Розглянемо, як приклад, динамічну схему вібраційного сепаратора з горизонтальним збуренням сит. При цьому вважатимемо:

1. Маса контейнера разом із ситами дорівнює  $M$ . Контейнер здійснює зворотно поступальний горизонтальний рух, а сита нахилені до горизонту під кутом  $\beta$ . Сили тертя (опору) руху контейнера пропорційні до його швидкості руху,  $k$  – коефіцієнт пропорційності.

2. Усі пружини підвіски вібросепаратора однакової жорсткості задовольняють лінійному закону пружності;  $c$  – жорсткість еквівалентної пружини.

3. Сипке середовище моделюється у вигляді нашарування плоских пружно-пластичних балок, які характеризуються сталою складовою швидкості руху  $V$ , тобто відносний закон руху (стосовно сита) довільної частинки середовища  $\zeta = Vt + u(x, t)$ .

4. Маса сипкого середовища, яке знаходиться на ситі, дорівнює  $ml$ , яка залишається незмінною. Тут  $m$  – маса одиниці довжини середовища, що сепарується;  $l$  – довжина сита вібросепаратора.

5. Вібробудник обертається із сталою кутовою швидкістю  $\mu$ , його маса –  $M_0$ , а ексцентриситет –  $e$ .

Відповідно до теореми про зміну кількості руху механічної системи [6], у диференціальній формі у проекції нерухому горизонтальну вісь  $O\xi$  отримаємо

$$\frac{d}{dt} \left\{ (M + ml) \dot{\xi} + M_0 \left( \dot{\xi} + \mu e \cos(\mu t + \mathcal{G}_0) \right) + \rho l \left[ V + \frac{\partial u\left(\frac{l}{2}, t\right)}{\partial t} \right] \cos \beta \right\} = -c\xi - k\dot{\xi} + mlg \cos \beta, \quad (1)$$

де  $\mathcal{G}_0$  – початкова фаза вібробудника.

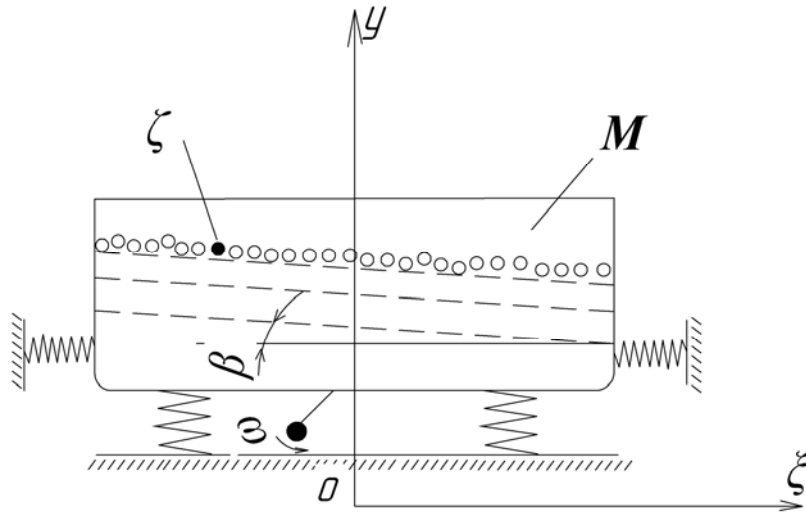


Рис. 4. Динамічна схема вібраційного сепаратора для розділення сипкого матеріалу

Співвідношення (1) після нескладних перетворень приводимо до вигляду

$$\bar{M}\ddot{\xi} + k\dot{\xi} + c\xi = M_0 e \mu^2 \sin(\mu t + \vartheta_0) + \rho l \frac{\partial^2 u\left(\frac{l}{2}, t\right)}{\partial t^2} \cos \beta + m l g \cos \beta, \quad (2)$$

де  $\bar{M} = M + \rho l + M_0$ .

Примітки:

1. Кількість руху середовища дорівнює добутку його маси на швидкість руху його центра мас.

2. Шляхом зміщення початку системи відліку, яка визначає положення контейнера на величину  $M_0 t g \cos \beta / c$ , завжди можна досягти того, що останній доданок у рівнянні руху контейнера буде відсутній.

Беручи до уваги лінійність звичайного диференціального рівняння (2), можемо стверджувати, що резонансні коливання сипкого середовища можливі тільки у випадку, коли одна із власних частот частотного спектра сипкого середовища  $\omega_k(a)$  збігається із частотою періодичного збурення віброзбудника, тобто

$$\mu = \tilde{\omega}(a) = \frac{\pi \omega(a)}{\Pi_T} = a^{\frac{\nu}{2}} \sqrt{\frac{ES}{\rho} \left( \frac{k \Pi_x}{l} \right)^{\frac{\nu+2}{2}}} \frac{\pi \Gamma\left(\frac{1}{2} + \frac{\nu+1}{\nu+2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{\nu+1}{\nu+2}\right)}. \quad (3)$$

Тому нижче розглядатимемо саме цей випадок. Для нього загальний розв'язок лінійного однорідного рівняння, яке відповідає (2), визначається залежністю

$$\xi(t) = C_1 \exp(-\eta t) \cos\left(\sqrt{\frac{c}{M} - \eta^2} t + \phi_0\right) + \tilde{\xi}(t), \quad (4)$$

де  $\eta = \frac{k}{2M}$ ,  $\tilde{\xi}(t)$  – частинний розв'язок;  $C_1$  та  $\phi_0$  – сталі, які визначаються із початкових умов.

Власні коливання контейнера завдяки наявності сил тертя (опору) швидко зникають. Отже, у контейнері із сипким середовищем, що сепарується, встановлюється динамічний процес із частотою, близькою до частоти віброзбудника. Таку саму частоту матиме і сипке середовище.

Частинний розв'язок рівняння (2) з точністю до величин вищого порядку, який описує рух частинки середовища, що сепарується, набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned} \tilde{\xi}(t) = & \frac{M_0 e \mu^2}{c \sqrt{\left[\frac{c}{M} - \mu^2\right]^2 + \frac{k^2 \mu^2}{M^2}}} \sin(\mu t + \phi_1) - \\ & - a \tilde{\omega}^2(a) \frac{\cos \beta}{\sqrt{\left[\frac{c}{M} - \tilde{\omega}^2(a)\right]^2 + \frac{k^2 \mu^2}{M^2}}} \sin\left(\tilde{\omega}(a)t + \frac{\pi}{2} + \phi_2\right), \end{aligned} \quad (5)$$

де  $\phi_1$  та  $\phi_2$  – початкові фази часткового розв’язку.

З іншого боку, інтенсивність процесу вібророзпарції залежить як від амплітуди, так і від частоти коливань середовища, що сепарується. Критерій оптимізації процесу вібророзпарції [7] можна описати функцією  $K = K(a, \omega(a))$ , яка залежить від амплітуди та частоти коливань вібробудника. Функція  $K(a, \tilde{\omega}(a))$  прийматиме екстремальне значення, якщо  $\frac{dK}{da} = 0$ , тобто:

$$\frac{\partial K}{\partial a} + \frac{\nu}{2} a^{\frac{\nu-2}{2}} \sqrt{\frac{ES}{\rho}} \left(\frac{k \Pi_x}{l}\right)^{\frac{\nu+2}{2}} \frac{\pi \Gamma\left(\frac{1}{2} + \frac{\nu+1}{\nu+2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{\nu+1}{\nu+2}\right)} \frac{\partial K}{\partial \tilde{\omega}} = 0. \quad (6)$$

Залежність (6) є базовою для визначення оптимальної амплітуди вібробудника сепаратора. Нехай найменшим додатним коренем рівняння (6) є  $\hat{a}$ . Тоді оптимальна частота обертання вібробудника дорівнюватиме

$$\mu = (\hat{a})^{\frac{\nu}{2}} \sqrt{\frac{ES}{\rho}} \left(\frac{k \Pi_x}{l}\right)^{\frac{\nu+2}{2}} \frac{\pi \Gamma\left(\frac{1}{2} + \frac{\nu+1}{\nu+2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{\nu+1}{\nu+2}\right)}. \quad (7)$$

Одночасно вищенаведене дає змогу знайти мінімальну потужність двигуна вібробудника. Справді, із правої частини диференціального рівняння (2) чи (5) у разі резонансних коливань середовища, що сепарується з точністю до величин вищого порядку, матимемо

$$M_0 e = \rho l \hat{a} \cos \beta. \quad (8)$$

Отже, мінімальний ексцентриситет вібробудника сепаратора дорівнює

$$e = \frac{\rho l \hat{a} \cos \beta}{M_0}.$$

Приймаючи вібробудник за ексцентрично насаджений на горизонтальну вісь електродвигуна приводу сепаратора круглий диск, знаходимо мінімальну потужність електродвигуна:

$$N_{\min} = g l \cos \beta (\hat{a})^{\frac{\nu}{2}+1} \sqrt{\rho ES} \left(\frac{k \Pi_x}{l}\right)^{\frac{\nu+2}{2}} \frac{\pi \Gamma\left(\frac{1}{2} + \frac{\nu+1}{\nu+2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{\nu+1}{\nu+2}\right)}. \quad (9)$$

Нижче, на рис. 5 зображено залежності мінімальної потужності електродвигуна вібраційного сепаратора від довжини та кута нахилу сита та густини сипкого середовища.

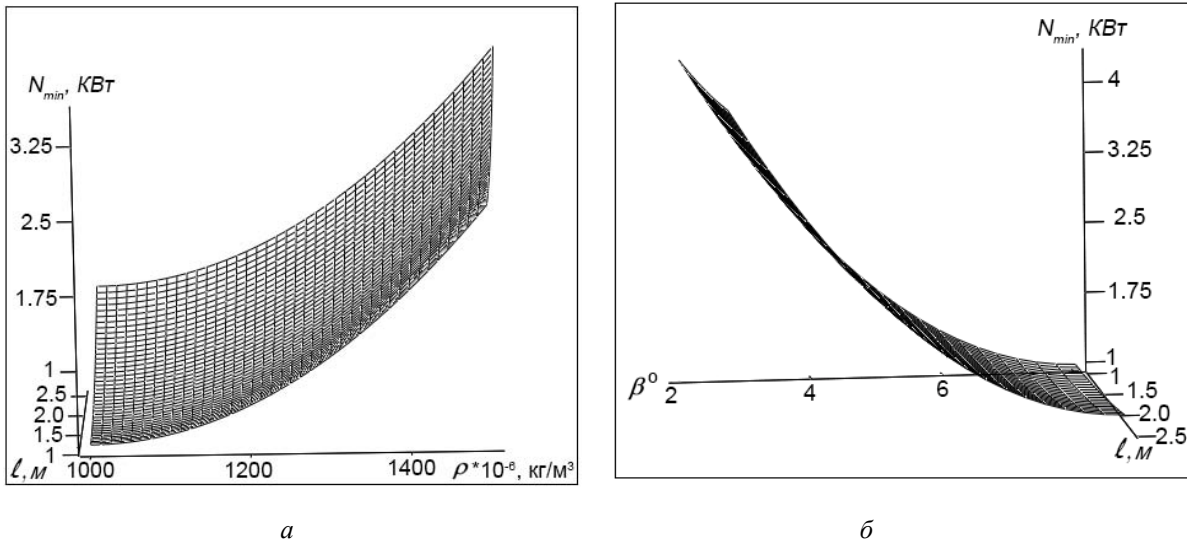


Рис. 5. Залежність необхідної мінімальної потужності електродвигуна вібраційного сепаратора від:  
 а – довжини контейнера вібросепаратора (довжини сита) та густини середовища, що сепарується;  
 б – від кута нахилу сита та довжини контейнера вібросепаратора

**Висновки.** Отримані розрахункові формули (6), (7), (9) дають змогу визначити основні динамічні характеристики вібраційного сепаратора для сепарації сипких матеріалів. Вказані формули можуть слугувати і для розрахунку приводів машин для віброоброблення та вібротранспортування.

1. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники / И.И. Быховский. – М.: Машиностроение, 1969. – 452 с. 2. Гончаревич И.Ф. Вибрационные грохоты и конвейеры / И.Ф. Гончаревич, В.Д. Земсков, В.И. Корешков. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 380 с. 3. Горячкин В.П. Сельскохозяйственные машины и орудия. Теория / В.П. Горячкин. – М.: Колос. – 1968. – 720 с. 4. Докукин А.В. Мощные вибрационные питатели и питатели-грохоты / А.В. Докукин, И.Ф. Гончаревич. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1968. – 184 с. 5. Повідайло В.А. Вібраційні процеси та обладнання / В.А. Повідайло. – Львів, 2004. – 248 с. 6. Боголюбов Н.Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Н.Н. Боголюбов, Ю.А. Митропольский. – М.: Наука, 1974. – 504 с. 7. Стоцько З.А., Сокіл Б.І., Топільницький В.Г. “Вплив конструкційних і кінематичних параметрів вібромашини на підвищення інтенсивності об’ємного оброблення”, Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях”. – 2002. – №4(25) – С. 46–52.