

**I. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН****Топільницький В.Г.**

к.т.н., доцент

Кусий Я.М.

к.т.н., доцент

Ребот Д.П.

к.т.н., асистент

**Національний
університет «Львівська
політехніка»****Topilnytsky V.****Kusyi Ya.****Rebot D.****Lviv Polytechnic National
University****УДК 621.7.02****МОДЕЛЬ ОПИСУ
ТЕХНОЛОГІЧНОГО
СЕРЕДОВИЩА
ОБРОБЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ
ВІБРАЦІЙНОГО ТИПУ**

Побудована нелінійна математична модель опису динаміки технологічних середовищ оброблювальних систем вібраційного типу, яка враховує фізико-механічні властивості частин оброблювального середовища і оброблюваних виробів (заготовок). Модель, отримана з використанням асимптотичних методів нелінійної механіки, дає змогу аналітично дослідити вплив параметрів середовища на ефективність функціонування всієї вібраційної системи з метою її оптимізації як на стадії проектування так і при виборі режимів експлуатації. Вона може входити до складу комплексної моделі для дослідження динамічних процесів оброблювальних систем вібраційного типу та бути частиною систем їх автоматизованих розрахунків. На основі моделі досліджено та проаналізовано усталений та перехідний динамічні процеси, що відбуваються в технологічному середовищі при поверхневому вібраційному зміцненні виробів.

Ключові слова: технологічне середовище, вібраційна система, нелінійна модель, пружна підвіска, дебалансний привід.

Постановка проблеми. Вібраційні технології впевнено набули широкого розповсюдження в різних галузях промисловості, сільського господарства країн світу та України зокрема. Маючи високу експлуатаційну надійність та уніфікованість вібраційне обладнання дозволяє реалізувати низку операцій від поверхневого оброблення виробів (зміцнення, очищення поверхонь, шліфування тощо), до приготування сумішей сипких матеріалів (або їх сепарування), проведення операцій дроблення матеріалів чи їх транспортування. Рушійною силою таких систем є вібраційна енергія направленої дії, яка, власне, і реалізує технологічні операції перелічені вище.

Оброблювальна система вібраційного типу складається з кількох динамічно пов'язаних частин. Насамперед це сама вібраційна машина (дробарка, млин, сепаратор, змішувач тощо) з робочим органом, пружною підвіскою (пружинного, пневматичного, маятникового чи інших типів) та приводом (переважно інерційного чи електромагнітного виду). В середині робочого органу

розміщується технологічне середовище, що представляє собою сукупність окремих тіл, фізико-механічні властивості яких варіюються в залежності від виду операції, яку має реалізувати та чи інша оброблювальна система вібраційного типу. В технологічному середовищі розміщуються оброблювальні тіла (вироби, заготовки). Вони зазнають вібраційного впливу, сприймаючи вібраційну енергію від приводу оброблювальної системи через її робочий орган та складові технологічного середовища. Технологічним середовищем можуть бути і самі оброблювальні вироби (матеріали), якщо мова йде про процес вібраційного змішування чи сепарування.

Оброблювальна система вібраційного типу є складною динамічною системою, ефективність функціонування якої визначається багатьма чинниками. Сюди відносимо і параметри приводу, жорсткість підвіски, форму і розміри її робочих органів, параметри самих технологічних середовищ та чинники взаємовпливу складових самої системи. Проведення досліджень ефективності роботи



вібраційних систем є актуальною прикладною задачею, так як вони дають змогу оптимізувати саму вібраційну операцію з точки зору підвищення її часової інтенсивності, зменшення матеріало- та енергозатрат на її проведення та мінімізації шкідливого впливу на довкілля. Адекватне проведення даних досліджень з можливістю їх подальшої автоматизації не реальне без ґрунтовного математичного опису як самої вібраційної системи, так і її технологічних середовищ. Реалізувати дану задачу можливо через побудову нелінійних математичних моделей опису функціонування оброблювальних систем вібраційного типу як в цілому, так і її складових частин, зокрема, побудову моделей їх технологічних середовищ. Останньому власне і присвячені проведені дослідження, результати яких викладені нижче.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Так як функціонування оброблювальної системи вібраційного типу є в адекватному описі складною нелінійною задачею динаміки, для її розв'язку були прийняті деякі спрощення. Суть їх полягала в тому, що вплив технологічного середовища при моделюванні руху самої вібраційної машини реалізовувався через приєднану до робочого органу масу з деякими поправочними коефіцієнтами [1], [2], [3]. Дослідження динаміки власне самих технологічних середовищ проводилось експериментально [4], або через створення математичних моделей різного типу [5]. Проте дані моделі, для спрощення досліджень, були або повністю лінеаризовані, або стосувались розгляду динаміки лише окремих частинок технологічного середовища, знову ж таки у лінійній постановці [3]. Припущення такого типу при побудові математичних моделей технологічних середовищ суттєво обмежують можливість їх прикладного застосування. Існують моделі опису руху середовищ вібраційних машин і в нелінійній постановці [6], однак побудова нелінійних моделей інших типів, представлених в аналітичних математичних виразах, застосування яких можна автоматизувати, інтегрувавши в програмне забезпечення, зокрема в системи автоматизованих розрахунків (CAE), є актуальним питанням сьогодення.

Формулювання мети досліджень.

Побудова нелінійної моделі опису технологічних середовищ оброблювальних систем вібраційного типу, яка враховує фізико-механічні властивості частин оброблювального середовища і оброблюваних виробів (заготовок). Дана модель уможливить вивчення динамічних явищ в технологічному середовищі для визначення впливу параметрів середовища на чинники ефективності функціонування

оброблювальних систем вібраційного типу.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Відповідно до типу технологічного середовища, зокрема величини його частинок, розмірів заготовок, які обробляються, фізичних та механічних параметрів матеріалів з яких вони зроблені, і відповідного їхнього співставлення між собою, математична модель, яка описує динаміку середовища (нелінійні дифференціальні рівняння його руху та їх числово-символьні розв'язки), буде мати декілька видів запису. Розглянемо модель технологічного середовища для конкретного виду вібраційної оброблювальної операції, а саме: вид оброблення – підвищення міцності заготовок методом наклепу, підвищення опору корозії. Розміри частин середовища та заготовок, що піддаються обробленню, приблизно однакові (різниця до 25%), тип матеріалу теж однаковий (наприклад, сталь різних марок).

Щоб створити модель для даного типу задач необхідно прийняти деякі припущення. Зокрема, нехай технологічне середовища оброблювальної системи вібраційного типу є однорідним, анізотропним та моделюється множиною пластин (рис.1). Дані пластини є паралельні та пластично-пружні. Множина пластин може контактувати із стінками робочого органу оброблювальної вібраційної системи шарнірно, пружно, жорстко. Останнє відобразить різні випадки взаємовпливу між технологічним середовищем та оброблювальною вібраційною системою. Технологічне середовище із виробами, що піддаються обробленню, відносно робочого органу системи та рухомої системи координат $Y_1O_1X_1$, пов'язаної з ним, є в плоско-паралельному русі – в площинах подачі вібраційної енергії від стінок робочого органу системи. Щодо нерухомої системи координат YOX , яка пов'язана з рамою вібраційної оброблювальної системи, технологічне середовище із виробами перебуває в складному русі. Тут можна виділити два види його рухів як підвидів складного руху: відносний рух середовища (рух однієї з множини пластин) у вигляді коливання по осі ξ , яка визначає довжину пластини; та переносний рух пластини як єдине ціле разом з робочим органом оброблювальної системи вібраційного типу.

Виділимо певний i -й поперечний переріз певної проміжної пластини в нашаруванні середовища – точку M та представимо його на рис. 1. в сукупності з робочим органом вібраційної оброблювальної системи з пружною підвіскою, наприклад, маятникового типу.

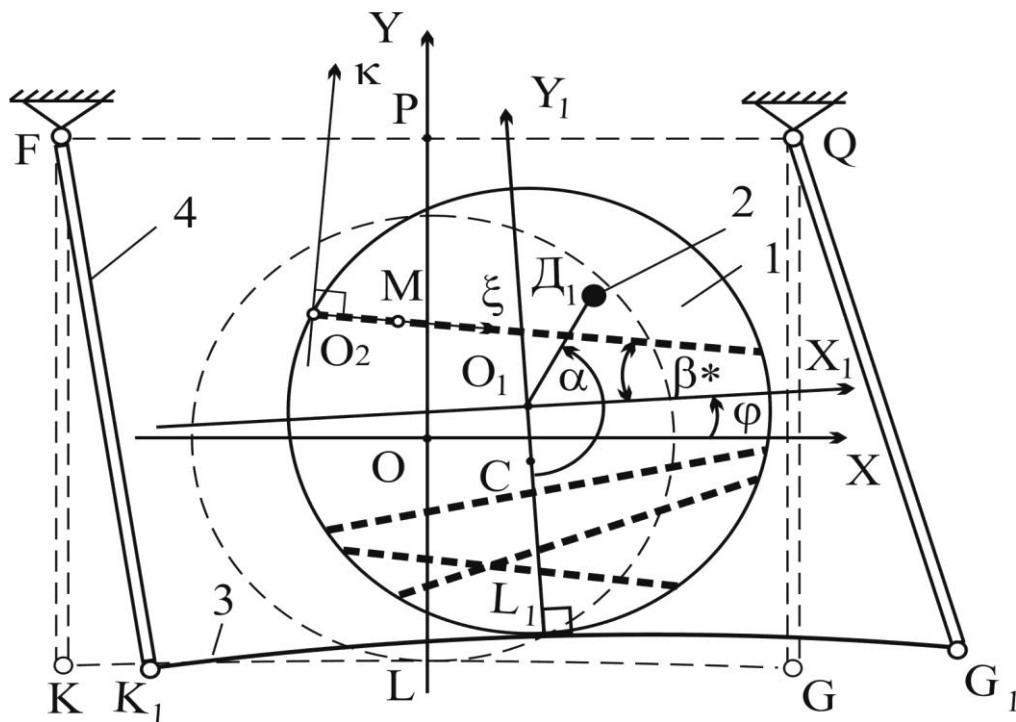


Рис. 1. Модельне представлення технологічного середовища в русі з робочим органом оброблювальної системи вібраційного типу та маятниковою підвіскою

На рисунку прийнято такі позначення: 1 – оброблювальна система вібраційного типу з технологічним середовищем у вигляді пластин, що мають пружні та пластичні властивості одночасно, причому контакт з робочим органом вібраційної системи є пружним; $\xi O_2 K$ – координатна система, що прикріплена до досліджуваної пластини; β^* – нахил досліджуваної пластини до дна робочого органу вібраційної оброблювальної системи; 2 – неврівноважена обертова маса, яка створює вібраційні коливання; 3 – ресора пружної підвіски, 4 – маятник ресори пружної підвіски.

Даний спосіб моделювання дозволить відобразити процес циркуляції технологічного середовища та виробів, що піддаються обробленню, по об'єму робочого органу у процесі функціонування вібраційної системи.

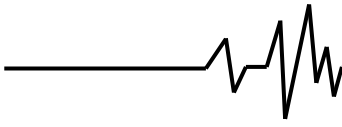
В шарі технологічного середовища, при його русі, виникатиме деформація та напруження відповідно його пружно-пластичних параметрів. Співвідношення між останніми можна записати на основі закону нелінійності Фохта з нелінійною в'язкою складовою напруження:

$$\sigma = E\xi + k_0 \left(\frac{d\xi}{dt} \right)^{\nu+1} \quad (1)$$

В (1) σ – нормальне напруження в досліджуваній пластині (в плоскому перерізі середовища); E , k_0 , ν – параметри, які відображають пружно-в'язкі характеристики середовища; $\xi = \frac{\partial u}{\partial \xi}$ – деформація поперечного перерізу пластини (у точці M) досліджуваної пластини ($u = u(\xi, t)$ - закон руху по осі ξ точки M за час t). У досліджуваній пластині виникатиме сила внутрішнього тертя R , яка є функцією параметрів технологічного середовища та координати розміщення розглянутого перерізу шару технологічного середовища. Ця ж сила описуватиме тертя між окремими частинками середовища у процесі функціонування системи вібраційного типу.

Згідно введених припущень, закон руху поперечного перерізу шару технологічного середовища, тобто точки M по осі ξ , матиме вигляд:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} - \beta \left(\frac{\partial^3 u}{\partial \xi^2 \partial t} \right)^{\nu+1} = f(t) + \frac{\partial u}{\partial t} (\vartheta + \delta u^2) \quad (2)$$



В (2) α , β , ϑ , δ – параметри, що відображатимуть тип матеріалу технологічного середовища. Це може бути, наприклад, сталь – при поверхневому зміцненні, абразив – при поліруванні чи шліфуванні; $f(t)$ – сила впливу робочого органу оброблювальної

системи вібраційного типу на сипуче середовище (так звана сила збурення). Розписавши значення сили збурення та після деяких перетворень в (1) матимемо модель (рівняння) опису динаміки технологічного середовища, що має нелінійний вид в'язкої складової напруження:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} = \varepsilon \left[\left(\frac{\partial^3 u}{\partial \xi^2 \partial t} \right)^{v+1} + (\vartheta_1 + \delta_1 u^2) \frac{\partial u}{\partial t} + b_1 \sin \mu t \right]. \quad (3)$$

В (3) ε , b_1 та μ – константи, що відображають вплив робочого органу вібраційної системи на технологічне середовище. Нехай умови взаємодії технологічного середовища та робочого органу

оброблювальної системи математично моделюється як шарнірна в'язь ($u(0, t) = u(l, t) = 0$). Відповідно розв'язок рівняння (3) матиме вигляд:

$$u_k(\xi, t) = a(t) \tilde{\Xi}_k(\xi) \cos(\omega_k^* t + \theta(t)) \quad (4)$$

В рівнянні (4) $\omega_k^* = \alpha \frac{k\pi}{l}$, де l – довжина шару технологічного середовища в робочому органі системи вібраційного типу), $k = 1, 2, \dots$;

$a(t)$ і $\theta(t)$ – відповідно амплітуда та фаза коливань досліджуваного перерізу шару технологічного середовища. Ці функції визначатимуться з виразу:

$$\begin{cases} \dot{a} = \frac{\varepsilon}{\omega^* p} \int_0^l \int_0^l \left(\frac{\partial^3 u}{\partial \xi^2 \partial t} \right)^{v+1} + (\vartheta_1 + \delta_1 u^2) \frac{\partial u}{\partial t} + b_1 \sin \mu t \sin \frac{\pi \xi}{l} \sin \psi d\xi d\psi; \\ \dot{\theta} = \frac{\varepsilon}{\omega^* ap} \int_0^l \int_0^l \left(\frac{\partial^3 u}{\partial \xi^2 \partial t} \right)^{v+1} + (\vartheta_1 + \delta_1 u^2) \frac{\partial u}{\partial t} + b_1 \sin \mu t \sin \frac{\pi \xi}{l} \cos \psi d\xi d\psi, \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{де } p = \int_0^l \tilde{\Xi}^2(\xi) d\xi, \quad \psi = \omega^* t + \theta(t).$$

Після запуску оброблювальної системи вібраційного типу та закінченні усіх перехідних процесів технологічне середовище має встановлений вид руху. У такому випадку рівняння (5) має вигляд:

$$a_2 = \sqrt{\frac{16\varepsilon}{3\delta_1} \left(\frac{\pi^2}{l^2} - \vartheta_1 \right)}$$

Як бачимо, амплітуда досліджуваної частинки технологічного середовища (точки М) є сталою, модель майже лінійна ($v = 0$).

Тепер розглянемо резонансний випадок

у вібраційній оброблювальній системі та технологічному середовищі. Відомо, що амплітудно-частотні характеристики нелінійних коливань системи визначаються фазою впливу приводу вібраційної системи. Тому внесемо у рівняння (5) різницю фаз $\Phi = \Psi - \gamma$, $\gamma = \mu t$. У випадку головного резонансу – частота коливань технологічного середовища співпадатиме з частотою приводу вібростеми $\omega^* \approx \mu$. Розв'язок рівняння (5) буде наступним:

$$\begin{cases} \frac{da}{dt} = \varepsilon \left[\frac{a}{2} \left(\frac{\pi^2}{l^2} - \vartheta_1 - \frac{3a^2 \delta_1}{16} \right) + \frac{2b_1 \cos \varphi}{\pi \omega^*} \right]; \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega^* - \mu - \frac{2\varepsilon b_1 \sin \varphi}{\pi \omega^* a}. \end{cases} \quad (6)$$

Відповідно рівняння (4) матиме асимптотичний тип розв'язку, який у першому наближенні для резонансного випадку виглядатиме так:

$$u(\xi, t) = a(t) \sin \frac{\pi \xi}{l} \cos(\varphi + \mu t),$$

де $a(t)$ та $\varphi(t)$ необхідно визначити з

системи нелінійних диференціальних рівнянь (6).

Наведемо приклад застосування отриманої моделі дослідження динаміки технологічного середовища, зокрема для резонансного випадку. На рис. 2 зображено графіки зміни амплітуди коливного руху досліджуваного технологічного середовища у часі за умови головного резонансу:

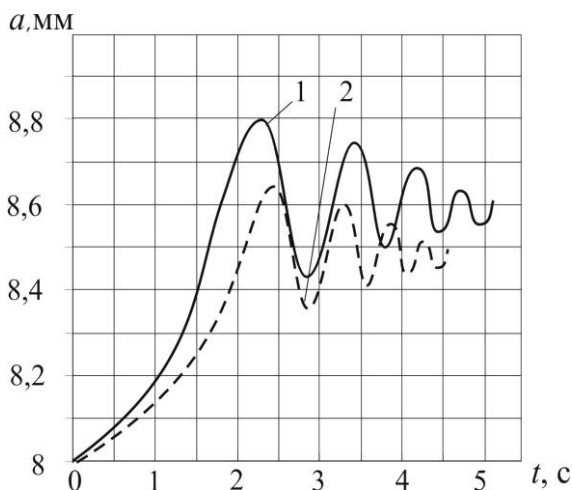


Рис. 2.а)

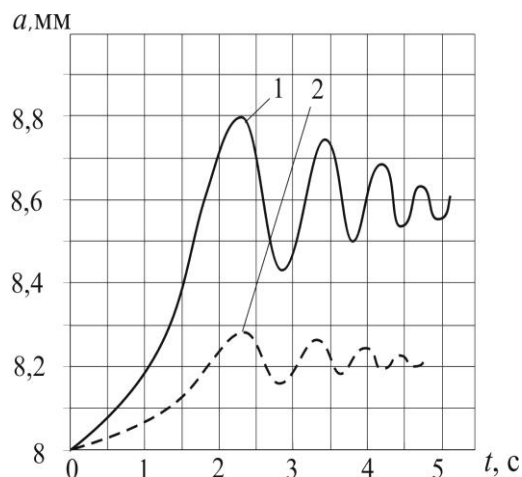


Рис. 2.б)

Рис. 2. Графіки зміни амплітуди коливного руху досліджуваного технологічного середовища у часі за умови головного резонансу (власна частота коливань середовища співпадає з частотою приводу вібростеми)

На рис. 2.а зображено графік для різних типів технологічних середовищ (1 – питома вага середовища 5 г/см³, амплітуда приводу вібростеми 5.5 мм, 2 – питома вага середовища 6.5 г/см³, амплітуда приводу вібростеми 5.5 мм); а на рис. 2.б – графік для різної величини сили впливу приводу вібростеми на технологічне середовище (1 – питома вага середовища 5 г/см³, амплітуда приводу вібростеми 5.5 мм, 2 – питома вага середовища 5 г/см³, амплітуда приводу вібростеми 2.5 мм).

Висновки. Побудовано нелінійну модель опису технологічних середовищ оброблювальних систем вібраційного типу, яка враховує фізико-механічні властивості частин оброблювального середовища і оброблюваних виробів (заготовок). Дана модель має аналітичне представлення. На її основі було досліджено усталений та перехідний динамічні процеси, що відбуваються у технологічному середовищі оброблювальної системи вібраційного типу при поверхневому зміцненні виробів. Резюмуючи результати досліджень слід наголосити:

1) незважаючи на первинні параметри процесу вібраційного оброблення, амплітуда коливного руху шару технологічного середовища у процесі поверхневого зміцнення приймає певне стале значення. Матимемо стійкий встановлений процес коливань;

2) значення амплітуди усталених коливань визначатиметься в залежності від фізичних та механічних характеристик технологічного середовища та виробів, що підлягають обробленню;

3) амплітуда коливного руху технологічного середовища під час

можливого резонансу визначається питомою вагою середовища та амплітудою коливань робочого органу оброблювальної системи;

б) графік розвитку амплітуди має виражену синусоїдальну складову яка перетворюється у пряму в районі певного усталеного значення;

в) подолання головного резонансу $\omega = \mu$ за мінімально можливий проміжок часу не викликати суттєвого підвищення амплітуди коливань технологічного середовища (зростання буде в межах 5%). Дана величина прямуватиме до певного усталеного значення, яке залежатиме від самих характеристик технологічного середовища та параметрів роботи вібростеми. Визначити величину амплітуди можливо шляхом числової інтеграції виразу (6).

Список використаних джерел

1. Topilnytskyy V. Modeling the dynamics of vibratory separator of the drum type with concentric arrangement of sieves / V. Topilnytskyy, D. Rebot, M. Sokil, O. Velyka, S. Liaskovska, I. Verkhola, R. Kovalchuk, L. Dzyubyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – VOL2, NO 7(86): Applied Mechanics. – P. 26–35.

2. Орищенко С. В. Дослідження динаміки вібраційного грохота та оцінка його ефективності / С.В. Орищенко, Б.В. Мацюк // Вібрації в техніці і технологіях. – 2013. – № 3 (71). – С. 120 – 125.

3. Субач А.П. Динамика процессов и машин объемной обработки / А.П. Субач; Рига: Зинатне, 1991. – 240 с.



4. Калмыков М.А. Поведение рабочей среды в контейнерах вибрационных станков / М.А. Калмыков, С.Н. Ясуник, А.В. Романченко // Вібрації в техніці і технологіях. – 2010. – № 3 (59). – С. 38 – 42.

5. Симоненко Т.Е. О разработке математической модели для обработки незакрепленных деталей / Т.Е. Симоненко, В.А. Барсуков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2011. – № 2 (23). – С. 201 – 205.

6. Боровець В.М. Вплив робочого середовища на кінематику вібраційних машин / В.М. Боровець, Я.В. Боровець // Вібрації в техніці і технологіях. – 2016. – № 2 (82). – С. 10 – 15.

Список джерел в транслітерації

1. V. Topilnytskyu. Modeling the dynamics of vibratory separator of the drum type with concentric arrangement of sieves / V. Topilnytskyu, D. Rebot, M. Sokil, O. Velyka, S. Liaskovska, I. Verkhola, R. Kovalchuk, L. Dzyubyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – VOL2, №7(86): Applied Mechanics. — P. 26–35.

2. Oryshchenko S. V. Doslidzhennia dynamiky vibratsiinoho hrokhota ta otsinka yoho efektyvnosti / S. V. Oryshchenko, B. V. Matsiuk // Vibratsii v tekhnitsi i tekhnolohiiakh. – 2013. – № 3 (71). – P. 120 – 125.

3. Subach A. P. Dynamyka protsessov y mashyn obemnoi obrabotky / A.P. Subach; Ryha: Zynatne, 1991. – 240 P.

4. Kalmykov M.A. Povedenye rabochei sredy v konteynerakh vybratsyonnykh stankov / Kalmykov M.A., Yasunyk S.N., Romanchenko A.V. // Vibratsii v tekhnitsi i tekhnolohiiakh. – 2010. – № 3 (59). – P. 38 – 42.

5. Symonenko T.E. O razrabotke matematicheskoi modeli dlia obrabotky nezakreplennykh detalei / Symonenko T.E., Barsukov V.A. // Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii. – 2011. – № 2 (23). – P. 201 – 205.

6. Borovets V.M. Vplyv robochoho seredovyscha na kinematyku vibratsiinykh mashyn / Borovets V.M., Borovets Ia.V. // Vibratsii v tekhnitsi i tekhnolohiiakh. – 2016. – № 2 (82). – P. 10 – 15.

МОДЕЛЬ ОПИСАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ СИСТЕМ ВИБРАЦИОННОГО ТИПА

Аннотация: Построенная нелинейная математическая модель описания динамики технологических сред обрабатывающих систем вибрационного типа, которая

учитывает физико-механические свойства частиц обрабатываемой среды и обрабатываемых изделий (заготовок). Модель, полученная с использованием асимптотических методов нелинейной механики, дает возможность аналитически исследовать влияние параметров среды на эффективность функционирования всей вибрационной системы с целью ее оптимизации как на стадиях проектирования та и при выборе режимов эксплуатации. Она может входить в состав комплексной модели для исследования динамических систем вибрационного типа и может быть частью систем их автоматизированного расчета. На основании модели исследовано и проанализировано стационарный и переходной динамические процессы, которые происходят в технологической среде при поверхностном вибрационном упрочнении изделий.

Ключевые слова: технологическая среда, вибрационная система, нелинейная модель, упругая подвеска, дебалансный привод.

DESCRIPTIVE MODEL OF THE TECHNOLOGICAL ENVIRONMENT OF THE VIBRATING TYPE PROCESSING SYSTEMS

Carrying out the researches of the effectiveness work of the vibration systems is an actual applied problem, because they enable to optimize the vibration operation itself in terms of increasing its time intensity, reducing material and energy costs for its implementation, and minimizing the harmful effects on the environment. Adequate carrying out of research data with the possibility of their further automation is not real without a thorough mathematical description of both the vibration system itself and its technological environments in particular. Realization of this problem is possible, due to the construction of nonlinear mathematical models of describing the functioning of the vibrating type processing systems, as a whole, and its components, in particular, the construction of models of their technological environments.

In the article, a nonlinear mathematical model for describing the dynamics of technological environments of the vibrating-type processing systems, which takes into account the physical and mechanical properties of the parts of the processing environment and the processed articles (blanks), is constructed. The model obtained with the using of asymptotic methods of nonlinear mechanics enables analytically investigate the influence of environmental parameters on the efficiency of the functioning of the vibration system in order to optimize it both at the design stage and in the choice of operating



modes. It can be included in the complex model for investigation of the dynamic processes of vibration type processing systems or be a part of systems of its automated calculations. Based on the model was investigated and analyzed the established and transitional dynamic processes,

what happens in the technological environment during the surface vibration strengthening of products.

Key words: technological environment, vibration system, nonlinear model, elastic suspender, unbalanced drive.

Відомості про авторів

Топільницький Володимир Григорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Проектування та експлуатація машин» Національного університету «Львівська політехніка» (вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013, e-mail: topilnvol@gmail.com).

Кусий Ярослав Маркіянович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Технологія машинобудування» Національного університету «Львівська політехніка» (вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013, e-mail: yarkym@ukr.net).

Ребот Дарія Петрівна – кандидат технічних наук, асистент кафедри «Проектування та експлуатація машин» Національного університету «Львівська політехніка» (вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013, e-mail: dasha_kotlyarova@ukr.net).

Топильницький Владимир Григорьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация машин» Национального университета «Львовская политехника» (ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, Украина, 79013, e-mail: topilnvol@gmail.com).

Кусый Ярослав Маркиянович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Национального университета «Львовская политехника» (ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, Украина, 79013, e-mail: yarkym@ukr.net).

Ребот Дария Петровна – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Проектирование и эксплуатация машин» Национального университета «Львовская политехника» (ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, Украина, 79013, e-mail: dasha_kotlyarova@ukr.net).

Topilnytskyi Volodymyr – PhD, Associate Professor of the Department of Designing and Operation of Machines of the Lviv Polytechnic National University (S. Bandery str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: topilnvol@gmail.com).

Kusyi Yaroslav – PhD, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies of the Lviv Polytechnic National University (S. Bandery str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: yarkym@ukr.net).

Rebot Dariya – PhD, Assistant of the Department of Designing and Operation of Machines of the Lviv Polytechnic National University (S. Bandery str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: dasha_kotlyarova@ukr.net).