

Боровець В. М.

Боровець Я. В.

*Національний
університет
“Львівська політехніка”*

Borovets V. M.

Borovets Ya. V.

*Lviv Polytechnic National
University*

УДК 621.01

ВПЛИВ РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА НА КІНЕМАТИКУ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН

Розглянуто актуальну задачу впливу динамічних параметрів робочого середовища у вібраційній машині з циліндричною робочою камерою та дебалансним приводом на процес обробки з метою інтенсифікації технологічного процесу. Визначено взаємодію робочого середовища та поверхні камери вібраційної машини, встановлено зміну траєкторії руху робочої камери в залежності від величини завантажувальної маси, та відповідно, її вплив на інтенсивність технологічного процесу. Здійснено аналіз зміни кутової швидкості середовища до моменту виходу машини на встановлений режим.

Ключові слова: вібраційна машина, робоча камера, робоче середовище, дебалансний привод.

Вступ. Впровадження прогресивних технологій обробки деталей обробляючим середовищем обмежується деякими фізичними факторами, пов'язаними з його рухом в контейнері машини, тому необхідно вивчити закономірності динамічної взаємодії робочих частинок і оброблюваних деталей під час знаходження їх в контейнері машини. Ефективність вібраційної обробки деталей безпосередньо пов'язаний із взаємним рухом робочого середовища та оброблюваних деталей. Тому, вивчення руху робочого середовища є однією з основних задач під час проведення дослідження руху елементів машин об'ємної обробки.

В той же час складність реального процесу об'ємної обробки в машині, завантаженої оброблюваними деталями та робочим середовищем, вимагає, з одного боку використання певних спрощень у побудові моделі процесу, а з другого боку – аналізу їх адекватності. Цій проблемі присвячено ряд робіт [1-4] в яких процеси оброблення деталей досліджувались теоретичними та експериментальними методами.

Аналізуючи взаємодію робочого середовища та поверхні камери вібраційної машини встановлено зміну траєкторії руху робочої камери, в залежності від величини завантажувальної маси, а відповідно її вплив на інтенсивність технологічного процесу.

Постановка задачі. В даній роботі розглянуто вплив завантаження на траєкторію руху робочої камери вібраційної машини з дебалансними вібробудівниками, та досліджено систему диференціальних рівнянь, що дозволяє описати роботу вібраційної машини із врахуванням робочого середовища. Можливість аналізу параметрів робочого середовища, робочої камери та їх взаємодії дозволяє здійснити оптимальний вибір, а тим самим забезпечити інтенсифікацію обробки деталей. Проведено аналіз чинників, що впливають на процес обробки деталей.

Аналіз останніх досліджень. Ефективність обробки залежить від багатьох факторів, одним із основних є взаємодія оброблюваних деталей і абразивних тіл і передача імпульсу енергії від робочої камери до оброблюваного середовища.

В літературі широко висвітлюються результати досліджень вібраційної обробки деталей у віброуючому абразивному середовищі [1, 3]. Найменш вивченим є питання впливу оброблюваного середовища на характер руху робочої камери, а відповідно на продуктивність, оскільки під час обробки змінюється характер взаємодії деталей і абразиву.

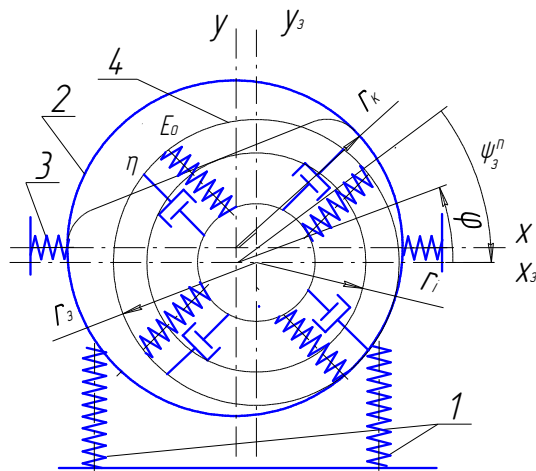
В залежності від параметрів робочої камери, її форми та кількості завантаженого робочого середовища можна отримати різноманітний характер руху в середині



контейнера, а отже різну інтенсивність обробки деталей.

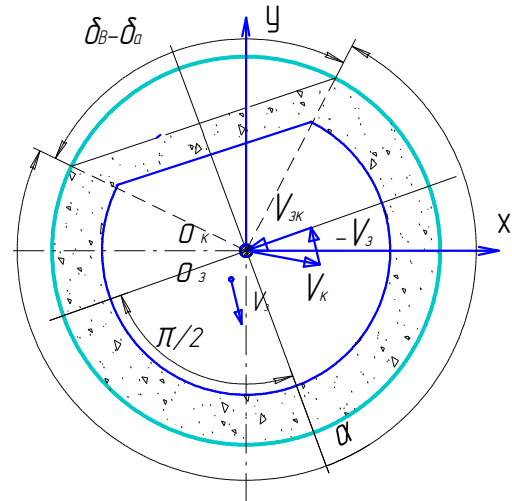
Виклад основного матеріалу. Під час вивчення руху робочого середовища розглянемо зовнішній шар, який межує із стінкою контейнера, оскільки саме в цьому шарі

відбувається найбільш інтенсивна обробка деталей (рис.1). В циліндричних робочих камерах поверхня контакту середовища обмежена кутами δ_a , δ_b , для випадку показаного на рис. 2.



а)

Рис. 1. Розрахункова схема вібростанини з врахуванням середовища: 1,3 – пружні опори; 2- робоча камера; 4 – робоче середовище



б)

Рис. 2. Поверхня контакту робочого середовища і стінок контейнера

Робоче середовище є складним об'єктом, що поєднує властивості сипких абразивних матеріалів та в'язких рідин, тому однозначний математичний опис його неможливий. Вибір моделі робочого середовища здійснюється з врахуванням характеру руху робочої камери машини і середовища, їх властивостей, способу введення деталей в робочий об'єм машини та просторового розташування [1, 5]. Об'ємна вібраційна обробка в більшості випадків здійснюється в робочій камері із завантаженням об'єму $\eta_3=0,6...0,75$ ($\eta_3 = V_{pc}/V_k$ - коефіцієнт завантаження).

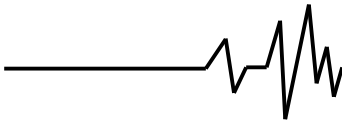
Для дослідження робочого середовища приймаємо одномасну модель. Такий вибір моделі обумовлюється тим, що ефект обробки в машині пов'язаний, в основному, з рухом певного "активного" шару, оскільки інша частина об'єму робочого середовища відіграє відносно другорядне значення. Враховуючи те, що в багатьох випадках для покращення процесу обробки до складу робочого середовища входять рідкі компоненти, приймаємо, що середовище має властивості

в'язкої рідини, зберігаючи також певні властивості сипкого матеріалу.

Розрахунки системи виконаємо в нерухомій системі координат, початок якої співпадає з положенням проекції повздовжньої осі робочої камери в стані спокою (рис.1.а), прийнявши координати центрів мас робочої камери x_k, y_k і робочого середовища x_3, y_3 . Вважаємо, що дебаланси співвісні з контейнером, обертаються синхронно і синфазно з постійною кутовою швидкістю та з'єднані з електродвигунами через пружні муфти.

В стані спокою робоче середовище займає нижню частину контейнера, при цьому $x_3 = x_{30} = 0, y_3 = y_{30} \neq 0$ ($y_{30} \approx r_k (\eta_3 - 1)$, r_k – радіус робочої камери).

Під час вивчення руху робочого середовища розглянемо зовнішній шар, який межує із стінкою контейнера, оскільки саме в цьому шарі відбувається інтенсивна обробка деталей (рис.1.б). Для опису руху робочого середовища введемо кутову швидкість обертання його поверхневого шару ψ_3^n .



Для оцінки кінетичної енергії робочого середовища, пов'язаної з його обертанням, приймаємо, що в області, прилеглий до центра мас середовища, обертання відсутнє, а в напрямку від центра мас до зовнішнього шару середовища кутова швидкість змінюється за лінійним законом:

$$\dot{\psi}_{(r)} = \dot{\psi}_3^n \frac{r_i}{r_3}, \quad (1)$$

де $r_3 = \sqrt{\eta_3} r_k$ – радіус циліндра, яким ми умовно замінюємо робоче середовище; r_i – радіус i -го шару середовища; r_k – радіус контейнера машини.

Згідно припущення про лінійну залежність кутової швидкості шарів робочого середовища, для шару, що знаходиться на відстані r від осі обертання “циліндра” середовища, маємо

$$V_{(r)} = r_i \dot{\psi}(r_i) = \frac{r_i^2}{r_3} \dot{\psi}_3^n. \quad (2)$$

Кінетичну енергію обертального руху робочого середовища можна визначити за формулою

$$T_{pc}^{об} = \frac{\rho_3 L}{2} \int_0^{r_3} \int_0^{2\pi} V^2(r_i) r_i dr_i d\alpha = \frac{I_3 (\dot{\psi}_3^n)^2}{3}, \quad (3)$$

де $I_3 = \frac{m_3 r_3^2}{2}$ – момент інерції “циліндра”

робочого середовища; ρ_3 – об'ємна густина робочого середовища; L – довжина контейнера; m_3 – маса завантаження робочого середовища.

Повна кінетична енергія робочого середовища рівна:

$$T_{pc} = \frac{m_3 (\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2)}{2} + \frac{1}{3} I_3 (\dot{\psi}_3^n)^2. \quad (4)$$

Кінетична енергія контейнера визначається за формулою:

$$T_k = \frac{m_k (\dot{x}_k^2 + \dot{y}_k^2)}{2} + \frac{I_k \dot{\phi}^2}{2}, \quad (5)$$

де m_k – маса робочої камери; I_k – момент інерції робочої камери; \dot{x}_k , \dot{y}_k – проекції швидкості центру робочої камери на осі x та y ; $\dot{\phi}$ – кутова швидкість центру робочої камери.

Для побудови математичної моделі вібраційної машини із врахуванням робочого середовища визначимо силові чинники, що діють за цих умов.

Під час обчислення віртуальної роботи, враховуючи, що робоче середовище має пружні властивості, роботу сил опору будемо визначати як віртуальну роботу деформації

$$\tilde{\delta} A_q = E_c S_k \tilde{\delta} q, \quad (6)$$

де E_c – величина, яка характеризує пружні властивості робочого середовища; $\tilde{\delta} q$ – величина деформації.

Враховуємо також, що під час відокремлення середовища від поверхні робочої камери в ньому відбувається розпушування на деяку глибину d_0 . Обчислюючи роботу деформації, величину E будемо визначати за формулою

$$E_c = E_c(d) = E_o \left(1 - e^{-\frac{d}{d_0}}\right) \quad (7)$$

де $d = \sqrt{(x_k - x_3)^2 + (y_k - y_3)^2} - |y_3^o|$ – оцінка деформації робочого середовища; E_o – модуль пружності ущільненого робочого середовища.

Площа поверхні, по якій відбувається деформація зовнішнього шару робочого середовища, є складною функцією, що залежить від відносного руху середовища та контейнера. Вираз для цієї функції не наводимо через його громіздкість. Враховуючи, що уточнення його несуттєво впливає на значення величин x_k , y_k , x_3 , y_3 , а також те, що основним, в даному випадку, є знаходження швидкості поверхневого шару робочого середовища $\dot{\psi}_3^n$, приймаємо наближено площу поверхні деформації

$$S_k = \pi r_k L \quad (8)$$

Для внутрішнього тертя між шарами робочого середовища, враховуючи властивості рідини, приймаємо

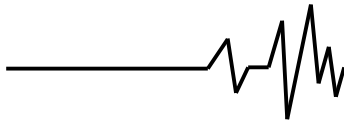
$$F_m \approx \mu \frac{dV}{dr}, \quad (9)$$

де μ – коефіцієнт тертя між шарами середовища.

Тоді для моменту сил внутрішнього тертя можна записати:

$$L_3 = 2 \mu \frac{m_3}{\rho_3} \dot{\psi}_3^n \quad (10)$$

Таким чином, враховуючи вплив середовища на роботу вібраційної машини система рівнянь, що характеризує рух елементів машини, записується наступним чином



$$\begin{cases} m_k \ddot{x}_k = -c_x x_k - \kappa_x \dot{x}_k + B S_\kappa E_c \cos \gamma_\kappa \operatorname{sign}(\dot{x}_3 - \dot{x}_k) + F_{mx}^\kappa ; \\ m_k \ddot{y}_k = -c_y y_k - \kappa_y \dot{y}_k + B S_\kappa E_c \sin \gamma_\kappa \operatorname{sign}(\dot{y}_3 - \dot{y}_k) + F_{my}^\kappa ; \\ I_k \ddot{\phi} = -c_\phi \phi - \kappa_\phi \dot{\phi} + M_m^\kappa ; \\ m_3 \ddot{x}_3 = B S_\kappa E_c \cos \gamma_{31} \operatorname{sign}(\dot{x}_k - \dot{x}_3) - F_{mx}^\kappa ; \\ m_3 \ddot{y}_3 = B S_\kappa E_c \sin \gamma_{31} \operatorname{sign}(\dot{y}_k - \dot{y}_3) - F_{my}^\kappa ; \\ \frac{2}{3} I_3 \ddot{\psi}_3^n = M_m^3 - L_3 . \end{cases} \quad (11)$$

де $\gamma_{31} = \arctg \frac{\dot{y}_3}{\dot{x}_3}$ – кут, що характеризує напрямок руху робочого середовища; κ_ϕ – коефіцієнт в'язкого опору підвіски відносно осі

повороту ϕ ; $F_{mx}^\kappa, F_{my}^\kappa$ – проекції рівнодійної сили тертя; B – функція, що враховує “зависання” середовища і визначається залежністю

$$B = B(x_3, y_3, x_k, y_k) = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{sign} \left[\sqrt{(x_k - x_3)^2 - (y_k - y_3)^2} - |y_3^o| \right] + 1 \right\}. \quad (12)$$

Система диференціальних рівнянь (11) дозволяє описати роботу вібраційної машини із врахуванням робочого середовища.

Чисельний розв'язок диференціальних рівнянь проводився за допомогою програмного забезпечення MathCAD для наступних значень параметрів вібраційної машини: маса контейнера $M_k = 96$ кг; момент інерції контейнера $I_k = 13,2$ кг·м², маса дебалансу $m_d = 2$ кг, радіус дебалансу $r_d = 0,125$ м, довжина контейнера $L = 0,7$ м, лінійні та кутова жорсткості пружної системи контейнера $c_x = 10^5$ н·м⁻¹, $c_y = 5 \cdot 10^5$ н·м⁻¹, $c_\phi = 1000$ н, коефіцієнти затухання відповідно $\kappa_x = \kappa_y = 80$ н·с·м⁻¹, $\kappa_\phi = 20$ н·с., коефіцієнт

завантаження $\eta_3 = 0,6 \div 1$, максимальна маса завантаження робочого середовища $M_3 \approx 300$ кг, об'ємна густина робочого середовища $d_3 \approx (2,2 \div 2,4) \cdot 10^3$ кг·м⁻³.

В результаті дослідження визначено вплив робочого середовища на траєкторію руху центра мас контейнера, яке зумовлює зменшення амплітуди коливань у встановленому режимі. Внаслідок взаємодії робочого середовища із стінкою контейнера значно змінюється траєкторія центра мас контейнера (рис.3), оскільки періоди їх коливань є різними.

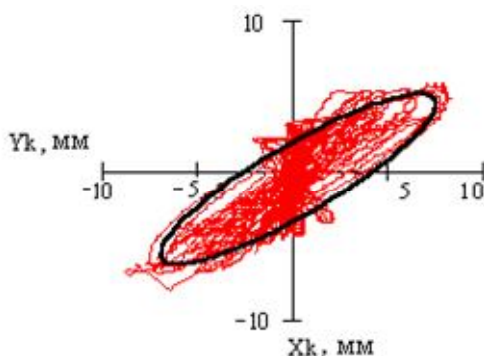


Рис. 3. Зона траєкторії коливань центра мас робочої камери

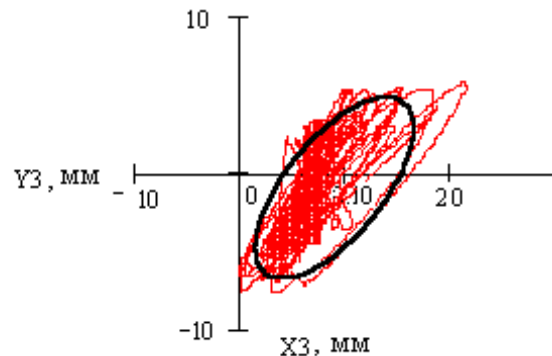
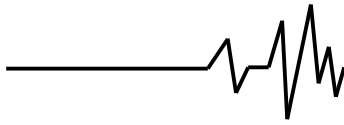


Рис. 4. Зона траєкторії коливань центра мас робочого середовища

Як видно з рис.4, під час роботи машини центр мас середовища займає положення, переважно, в нижній частині контейнера (одночасно зміщуючись вздовж горизонтальної

осі в напрямку, який залежить від напрямку обертання дебалансів), що підтверджує правильність припущень, прийнятих у розрахунку поверхні деформації робочого



середовища в момент його контакту зі стінкою камери. Одночасно центр мас робочого середовища знаходиться дещо вище початкового положення, що свідчить про можливість “зависання” маси робочого середовища.

Центри мас контейнера та робочого середовища коливаються за траєкторіями (рис.3, рис.4), відмінними від еліптичних, при цьому максимальні відхилення становлять відповідно приблизно 5 мм та 4,5 мм, що підтверджується експериментальними дослідженнями роботи вібраційної машини.

Аналізуючи характер зміни кутової швидкості середовища до моменту виходу машини на встановлений режим ($t \approx 2,5$ с)

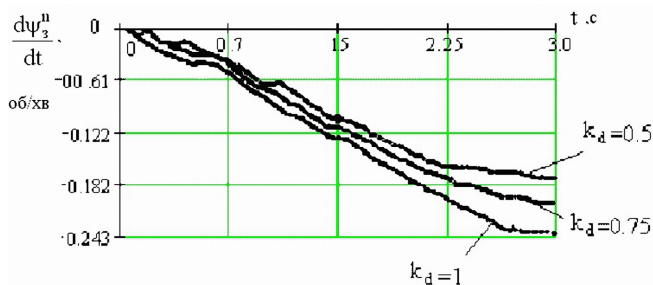


Рис. 5. Залежність швидкості руху поверхневого шару робочого середовища в камері від часу

Порівнюючи отримані розв'язки системи диференціальних рівнянь з експериментальними значеннями встановлено хорошу збіжність результатів параметрів руху контейнера та робочого середовища.

Висновки. Розглянутий розрахунок руху елементів вібраційної машини з циліндричною робочою камерою і врахуванням робочого середовища дозволить спростити розрахунок динамічної моделі, та на етапі проектування визначити її основні характеристики.

Дана методика розрахунку може бути застосована для конструювання вібраційних машин з дебалансним приводом і дозволить ефективно підбирати параметри машин та інтенсифікувати технологічний процес.

Список використаних джерел

1. Вібрації в техніці: справочник: [в 6 т.] / под. ред. Э. Э. Лавендела. – М.:

швидкість руху поверхневого шару робочого середовища значно залежить від збуджуючого зусилля (рис.5) і наближено лінійно від амплітуди коливань контейнера.

Як показали результати досліджень (рис.6) диференціальні рівняння (11) вірно описують рух робочого середовища в межах коефіцієнта завантаження $\eta_3 = 0,5 \div 1$, що в більшості випадків відповідає робочому процесу обробки. Коли ж завантаження машини є меншим половини об'єму робочої камери $\eta_3 < 0,5$, дані рівняння недостатньо точно описують характер руху середовища, оскільки площа контакту стінок контейнера та середовища незначна.

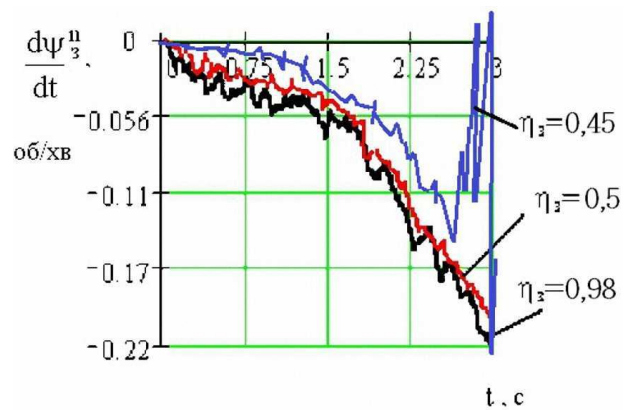


Рис. 6. Залежність швидкості руху поверхневого шару робочого середовища від часу при різних значеннях коефіцієнта завантаження η_3

Машиностроение, 1981. – Т. 4: Вибрационные процессы и машины. – 509 с.

2. Карташов И.Н., Шаинский М.Е., Власов В.А. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах. Киев: вища школа, – 1975. – 188 с.

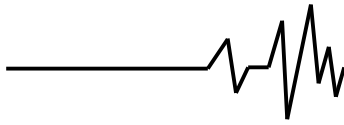
3. Бабичев А.П. и др. Физико-технологические основы методов обработки. Уч. пособие / ДГТУ. Изд. центр Ростов-на-Дону. – 2003. – 315с.

4. Бабичев А.П., Трунин В.Б., Самодумский В.П., Устинов В.П. Вибрационные станки для обработки деталей. – М.: Машиностроение, – 1984. – 168с.

5. А.П. Субач. Динамика процессов и машин объемной обработки. Рига: Зинатне, – 1991, – 392с.

Список джерел в транслітерації

1. Vibratsii v tehnikе: Spravochnik: [v 6 t.] / Pod. red. E. E. Lavendela. – М.:



Mashinostroyeniye, 1981. – Т. 4: vibratsionnyye protsessy i mashiny. – 509 s.

2. Kartashov I.N., Shainskiy M.Ye., Vlasov V.A. Obrabotka detaley svobodnymi abrazivami v vibriruyushchikh rezervuarakh. Kiyev: vysshaya shkola, 1975. – 188 s.

3. Babichev A.P. i dr. Fiziko-tekhnologicheskiye osnovy metodov obrabotki. Uch. posobiye / DGTU. Izd. tsentr Rostov-na-Donu. – 2003. – 315 s.

4. Babichev A.P., Trunin V.B., Samodumskiy V.P., Ustinov V.P. Vibratsionnyye stanki dlya obrabotki detaley. – M.: Mashinostroyeniye, – 1984. – 168 s.

5. A.P. Subach. Dinamika protsessov i mashin ob'yemnoy obrabotki. Riga: Zinatne, – 1991, – 392 s.

ВЛИЯНИЕ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ НА КИНЕМАТИКУ ВИБРАЦИОННЫХ МАШИН

Аннотация. Рассмотрена актуальная задача влияния динамических параметров рабочей среды в вибрационной машине с цилиндрической рабочей камерой и дебалансным приводом на процесс обработки с целью интенсификации технологического процесса. Определено взаимодействие рабочей среды и поверхности камеры вибрационной машины, установлено изменение траектории движения рабочей

камеры в зависимости от величины загрузочной массы, и соответственно, ее влияние на интенсивность технологического процесса. Проведен анализ изменения угловой скорости среды до момента выхода машины на установленный режим.

Ключевые слова: вибрационная машина, рабочая камера, рабочая среда, дебалансный привод.

INFLUENCE OF THE WORKING ENVIRONMENT ON THE KINEMATICS OF VIBRATING MACHINES

Annotation. The actual task of impact the dynamic parameters of the working environment in the vibrating machine with a cylindrical working chamber and debalance drive processing with the purpose of intensify the process was considered. The interaction of working environment and surface of camera vibration machine was developed. Changing the trajectory of the working chamber depending on the value of the boot mass and its influence on the intensity of the process were investigated. The changes in angular velocity environment to the moment to set normal mode of machine were analyzed.

Key words: vibrating machine, the working chamber, the working environment, unbalanced drive.