



Всеукраїнський науково-технічний журнал

All-Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2520-6168 (Print)

**Machinery
Energetics
Transport
of Agribusiness**



**ТЕХНІКА
ЕНЕРГЕТИКА
ТРАНСПОРТ АПК**



Всеукраїнський науково – технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. – Вінниця, 2019. – 1 (104) – 110 с.

Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного університету (протокол 11 від 27.06.2019 р.)

Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової інформації №21906-11806 Р від 12.03.2016р.

Журнал є друкованим засобом масової інформації, який внесено до переліку наукових фахових видань України з технічних наук (Додаток 12 до наказу Міністерства освіти і науки України 16.05.2016 № 515).

Головний редактор

Калетнік Г.М. – д.е.н., проф., академік НААНУ, Вінницький національний аграрний університет

Заступник головного редактора

Матвійчук В.А. – д.т.н., проф., Вінницький національний аграрний університет

Члени редакційної колегії

Анісімов В.Ф. – д.т.н., проф., Вінницький національний аграрний університет

Іскович – Лотоцький Р.Д. – д.т.н., проф., Вінницький національний технічний університет

Огородніков В.А. – д.т.н., проф., Вінницький національний технічний університет

Бурдо О.Г. – д.т.н., проф., академік АНТКУ, Одеська національна академія харчових технологій

Гулько І.В. – к.т.н., доц., Вінницький національний аграрний університет

Бандура В.М. – к.т.н., проф., Вінницький національний аграрний університет

Булгаков В.М. – д.т.н., проф., академік НААН, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Солона О.В. – к.т.н., доц., Вінницький національний аграрний університет

Іванов М.І. – к.т.н., проф., Вінницький національний аграрний університет

Кондратюк Д.Г. – к.т.н., доц., Вінницький національний аграрний університет

Любін М.В. – к.т.н., доц., Вінницький національний аграрний університет

Пришляк В.М. – к.т.н., доц., Вінницький національний аграрний університет

Серета Л.П. – к.т.н., проф., Вінницький національний аграрний університет

Веселовська Н.Р. – д.т.н., проф., Вінницький національний аграрний університет

Гевко Р.Б. – д.т.н., проф., Тернопільський національний економічний університет

Зарубіжні члени редакційної колегії

Володимир Крочко – д.т.н., проф., Словацький аграрний університет (м. Нітра, Словаччина)

Януш Новак – д.т.н., проф., Люблінський аграрний університет (м. Люблін, Польща)

Маріан Веселовські – д.т.н., проф., Люблінський природничий університет (м. Люблін, Польща)

Зденко Ткач – д.т.н., проф., Словацький аграрний університет (м. Нітра, Словаччина)

Семенс Івановс – д.т.н., проф., Латвійський аграрний університет (м. Улброка, Латвія)

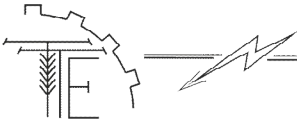
Людвікас Шпокас – д.т.н., проф., Університет Олександра Стулгинського (Литва)

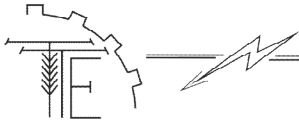
Марош Коренко – д.т.н., проф., Словацький аграрний університет (м. Нітра, Словаччина)

Ян Франчак – д.т.н., проф., Словацький аграрний університет (м. Нітра, Словаччина)

Володимир Юрча – д.т.н., проф., Чеський університет сільського господарства (м. Прага, Чехія)

Гражина Езевська-Вітковська – д.т.н., проф., Люблінський аграрний університет (м. Люблін, Польща)

**ЗМІСТ****I. МАШИНОВИКОРИСТАННЯ У РОСЛИННИЦТВІ ТА ТВАРИННИЦТВІ***Бабин І.А.***ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИЙ АПАРАТ РУХУ ДВОФАЗНОГО МІЮЧОГО РОЗЧИНУ ПО МОЛОКОПРОВІДНІЙ ЛІНІЇ.....5***Гунько І.В., Завальнюк П.Г., Ємчик В.В.***СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ РОБОТИЗОВАНІ МАШИНИ В НАВЧАЛЬНО-ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВАХ ННВК «ВСЕУКРАЇНСЬКИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ КОНСОРЦІУМ».....13***Курило В.Л., Пришляк В.М.***МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТЕБЕЛ ЯК ПЕРЕДУМОВА ДО РОЗРОБКИ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН І ФОРМУВАННЯ ПРОЕКТНИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ АГРОІНЖЕНЕРА.....20***Пришляк В.М., Курило В.Л.***НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ДИСКОВИХ ЗНАРЯДЬ ДЛЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ ЯК МЕТОДОЛОГІЧНА СКЛАДОВА ФОРМУВАННЯ ПРОФЕСІЙНИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ АГРОІНЖЕНЕРА.....28***Севостьянов І.В., Грицун А.В., Бабин І.А., Чуйко С.Л.***ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД НА ПІДПРИЄМТВАХ АПК.....36****II. ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС МОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ***Поляков А.П.***МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ НОМЕНКЛАТУРИ ТА КІЛЬКОСТІ ЗАПАСНИХ ЧАСТИН ДЛЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ СПЕЦІАЛЬНИХ МАШИН ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....47****III. ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ПЕРЕРОБНИХ І ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ***Веселовська Н.Р., Зелінська О.В., Гнатюк О.Ф., Іванчук Я.В.***МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ РЕЖИМІВ ВІБРАЦІЙНИХ ТА ВІБРОУДАРНИХ МАШИН.....56***Котов Б.І., Швидя В.О., Панцир Ю.І., Герасимчук І.Д.***МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЗЕРНОСУШАРКИ З ІНДУКЦІЙНИМ ПІДВЕДЕННЯМ ЕНЕРГІЇ.....64***Гунько І.В., Орлюк Ю.Т., Зозуляк О.В.***ВПЛИВ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ОБРОБКИ МОЛОКА НА ПРОЦЕС ТЕРМОКИСЛОТНОЇ КОАГУЛЯЦІЇ БІЛКІВ.....71****IV. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА***Будяк Р.В.***ОБРОБКА ГІЛЬЗ СИЛОВИХ ЦИЛІНДРІВ ГІДРОСИСТЕМ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН.....77****V. ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ***Видмиш А.А.***СИНХРОНІЗОВАНІ АСИНХРОННІ ДВИГУНИ З ФАЗНИМ РОТОРОМ ДЛЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ КОМПЛЕКСІ.....84**



VI. ТРАНСПОРТНІ ТА ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

Ляшук О.Л., Дзюра В.О., Клендій В.М., Бортник І.М., Задорожний В.Ю.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИПКИХ
МАТЕРІАЛІВ ТРУБЧАСТИМ СКРЕБКОВИМ ТРАНСПОРТЕРОМ89**

VII. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Дубчак В.М.

**РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПІДГОТОВКИ СУЧАСНИХ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ.....97**

VIII. ДУМКА МОЛОДОГО ВЧЕНОГО

Колесник Л.Г.

**ШЛЯХИ ОЧИЩЕННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПАЛИВА ДЛЯ РОБОТИ МАШИННО –
ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА.....103**

**III. ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ПЕРЕРОБНИХ І ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

УДК 510.5:621

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ РЕЖИМІВ ВІБРАЦІЙНИХ ТА ВІБРОУДАРНИХ МАШИН

Веселовська Наталія Ростиславівна, д.т.н., професор
Зелінська Оксана Владиславівна, к.т.н., доцент
Гнатюк Олена Федорівна, аспірант
Вінницький національний аграрний університет
Іванчук Ярослав Володимирович, к.т.н., доцент
Вінницький національний технічний університет

N. Veselovska, Doctor of Technical Sciences, Full Professor
O. Zelinska, PhD, Associate Professor
E. Gnatyuk, PhD, Associate Professor
Vinnytsia National Agrarian University
Y. Ivanchuk, PhD, Associate Professor
Vinnytsia National Technical University

В попередніх роботах проводилися дослідження основних режимів інерційного навантаження під час відпрацювання технологічних процесів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів способом віброударного пресування. Конструктивне виконання моделі інерційного вібропрес-молота та опис її параметрів дає можливість вибору різних режимів пресування, що дозволить оцінити ефективність їхнього застосування. Різні математичні моделі системи застосовувались при побудові точних розв'язків на етапах руху між ударами і в моменти співударянь. Вони описувалися лінійними диференціальними рівняннями або кінцевими співвідношеннями стереомеханічної теорії удару, які вводились в якості граничних умов процесу. Доцільно побудувати і проаналізувати єдину форму запису рівнянь рухів співударяючих елементів машин на всій часовій вісі, які описують повну сукупність реалізованих рухів. Це досягається за допомогою введення нелінійних залежностей, що відображають процес силової взаємодії співударяння або їх елементів.

Ключові слова: моделювання, вібраційні машини, віброударні машини, гідроімпульсний привід, ефективність, робочі режими пресування, віброударне пресування.

Рис. 2. Табл. 1. Ф. 18. Літ. 10.

1. Постановка проблеми

Технології, які характеризуються процесами формоутворення заготовок, в яких реалізується текучість матеріалів із складною реологією в умовах складного навантаження, потребують нових розробок, вивчення та вдосконалення. Широке використання знаходять вібраційні та віброударні технологічні процеси, а також обладнання для їх реалізації [1 – 3].

На основі дослідження закономірностей віброударного пресування для кожного типу порошкового матеріалу можна вказати найефективніший основний режим ВУП, а для конкретного зразка із заданого матеріалу – найраціональніше співвідношення величин енергії, при яких він досягає максимальної середньої щільності в разі мінімальної відносної нерівнощільності за об'ємом і відсутності на його поверхні ознак пере і недопресувань [4].

Тому побудова і аналіз єдиної форми запису рівнянь рухів співударяючих елементів машин на всій часовій вісі, які описують повну сукупність реалізованих рухів є актуальною задачею.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [1] сформовано основи теорії розрахунку та розробка процесів і обладнання для віброударного пресування. В роботах [1 – 4] даються основні напрямки досліджень в питаннях формоутворення заготовок, визначені проблеми формоутворення заготовок порошкових матеріалів.

3. Мета досліджень

Метою даного дослідження є побудова єдиної форми запису рівнянь рухів співударяючих елементів машин на всій часовій вісі, які описують повну сукупність реалізованих рухів.

4. Основні результати досліджень

У роботі [1] при побудові точних розв'язків застосовувались різні математичні моделі системи на етапах руху між ударами і в моменти співударянь. Перші описувались лінійними диференційними рівняннями, інші – кінцевими співвідношеннями стереомеханічної теорії удару, які вводились в якості граничних умов процесу. Застосована процедура пошуку періодичних рішень, в якій визначена регулярність співударянь може бути постульована, проте навіть і в даному випадку побудовані розв'язки не є цілком адекватними дослідним моделям із-за можливості додаткових перетинів траєкторіями тіл обмежувальних рівнів. Тому необхідно було перейти до побудови і аналізу єдиної форми запису рівнянь рухів співударяючих елементів машин на всій часовій вісі, яким можна буде описати повну сукупність реалізованих рухів. Це досягається за допомогою введення нелінійних залежностей, що відображають процес силової взаємодії співударяння тіл або їх елементів.

Вказані залежності будуються на основі силових характеристик контактної взаємодії $\Psi(x)$ або $\Psi(x, \dot{x})$ і, у випадку односторонньої ударної взаємодії при відносній координаті $x=\Delta$, має вигляд:

$$\Phi(x) = \Psi(x - \Delta)\eta(x - \Delta), \tag{1}$$

$$\Phi(x, \dot{x}) = \psi(x - \Delta, \dot{x})\eta(x - \Delta), \tag{2}$$

де $\eta(x)$ – функція одиничного стрибка Хевісайда [1]:

$$\eta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ 1 & x \geq 0. \end{cases}$$

У випадку симетричної двосторонньої взаємодії елементів ударної пари, встановлених при $x=0$ із загальним зазором 2Δ , аналогічні характеристики будуть мати наступний вигляд:

$$\Phi(x) = \Psi(|x| - \Delta)\eta(|x| - \Delta)\text{sign}(x); \tag{3}$$

$$\Phi(x, \dot{x}) = \Psi(|x| - \Delta, \dot{x})\eta(|x| - \Delta)\text{sign}(x) \tag{4}$$

Вирази типу (1), (3) будемо називати статичними, а типу (2), (4) – динамічними силовими характеристиками ударних пар.

Наприклад, при описі контактної взаємодії по теорії Герца [2], статичні характеристики у випадку двосторонніх співударянь приймуть вид (рис. 1, а):

$$\Phi(x, \dot{x}) = c_1 (|x| - \Delta, \dot{x})^{2/3} \eta(|x| - \Delta)\text{sign}(x), \tag{5}$$

а при апроксимації силової характеристики контактної взаємодії лінійною залежністю [5] маємо (рис. 1, б):

$$\Phi(x, \dot{x}) = c_2 (|x| - \Delta, \dot{x})\eta(|x| - \Delta)\text{sign}(x) \tag{6}$$

де c_1, c_2 – коефіцієнти пропорційності [1].

У загальному випадку для стаціонарної механічної системи із повною дисипацією c_{pq} і пружними зв'язками жорсткістю k_{pq} з n степенями вільності при наявності єдиної нелінійності у вигляді одновірної ударної пари, яка утворюється k -ою і m -ою масами (рис. 2),

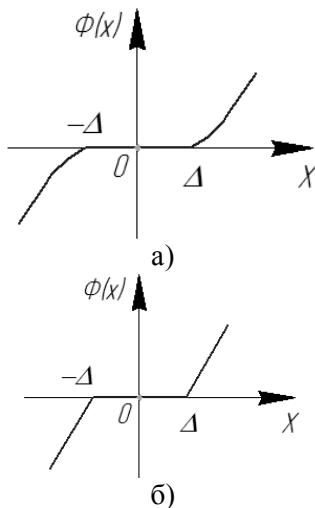


Рис. 1. Силова характеристика ударної взаємодії

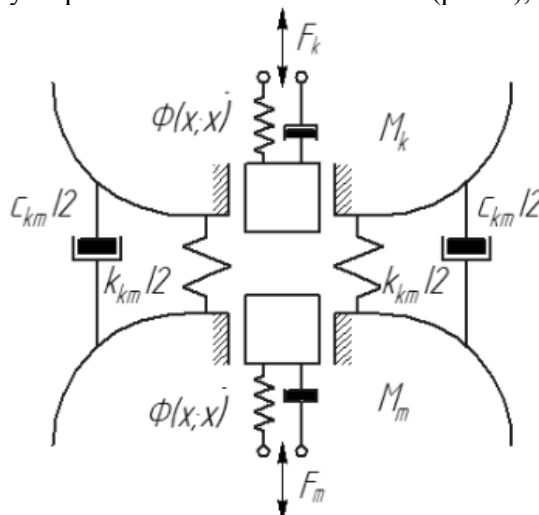


Рис. 2. Розрахункова схема взаємодії одновірної ударної пари



рівняння може бути представлене у вигляді

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{11}(s)x_1 + \dots + \Psi_{1k}(s)x_k + \dots + \Psi_{1m}(s)x_m + \dots + \Psi_{1n}(s)x_n = F_1(t) \\ \dots \\ \Psi_{k1}(s)x_1 + \dots + \Psi_{kk}(s)x_k - \Phi(x, sx) + \dots + \Psi_{km}(s)x_m + \dots + \Psi_{kn}(s)x_n = F_k(t) \\ \dots \\ \Psi_{m1}(s)x_1 + \dots + \Psi_{mk}(s)x_k + \dots + \Psi_{mm}(s)x_m + \Phi(x, sx) + \dots + \Psi_{mn}(s)x_n = F_m(t) \\ \dots \\ \Psi_{n1}(s)x_1 + \dots + \Psi_{nk}(s)x_k + \dots + \Psi_{nm}(s)x_m + \dots + \Psi_{nn}(s)x_n = F_n(t) \end{array} \right. \quad (7)$$

Використовуючи операційне числення [4], отримуємо

$$\Psi_{pq}(s) = M_{pq}s^2 + c_{pq}s + k_{pq} \rightarrow M_{pq}\ddot{x} + c_{pq}\dot{x} + k_{pq}x,$$

де M_{pq} – маса елемента ударної пари; c_{pq} – в'язкість демпфуючого елемента; k_{pq} – жорсткість пружного елемента; $p=1, \dots, n$; $q=1, \dots, m$; x_1, \dots, x_n – узагальнені координати віброударної системи; $x = x_m - x_k$ – координата відносного розташування співударяючих мас; $F_1(t), \dots, F_n(t)$ – узагальнені зовнішні сили.

Переносячи в (7) нелінійні члени в праву частину і розв'язуючи систему рівнянь як лінійну відносно координат x_k і x_m , знайдемо

$$\left\{ \begin{array}{l} x_k(t) = \left[\frac{\Theta_{kp}(s)}{\Psi(s)} - \frac{\Theta_{mk}(s)}{\Psi(s)} \right] \Phi[x(t), sx(t)] + \sum_{i=1}^n \frac{\Theta_{ki}(s)}{\Psi(s)} F_i(t) \\ x_m(t) = \left[\frac{\Theta_{mm}(s)}{\Psi(s)} - \frac{\Theta_{sm}(s)}{\Psi(s)} \right] \Phi[x(t), sx(t)] + \sum_{i=1}^n \frac{\Theta_{mi}(s)}{\Psi(s)} F_i(t) \end{array} \right. \quad (8)$$

де $\Psi(s) = \begin{vmatrix} \Psi_{11}(s) & \dots & \Psi_{1n}(s) \\ \dots & \dots & \dots \\ \Psi_{n1}(s) & \dots & \Psi_{nn}(s) \end{vmatrix}$ – характеристичний визначник лінійної частини системи; $\Theta_{pq}(s)$ –

алгебраїчне доповнення (pq) -го елемента цього визначника. В силу симетрії матриць коефіцієнтів квадратичних форм $\Theta_{pq}(s) \equiv \Theta_{qp}(s)$.

Віднімаючи в (8) із другого рівняння перше, отримаємо для координати x

$$\Psi(s)x(t) + \Theta(s)\Phi[x(t), sx(t)] = \sum_{i=1}^n I_i(s)F_i(t) \quad (9)$$

де $\Theta(s) = \Theta_{kk}(s) + \Theta_{mm}(s) - 2\Theta_{km}(s)$; $I_i(s) = \Theta_{im}(s) - \Theta_{ik}(s)$. Вирази $\Psi(s)$, $\Theta(s)$, $I_i(s)$ представляють собою поліноми від оператора диференціювання s , причому степінь $\Psi(s)$ рівна $2n$, степінь $\Theta(s)$ рівна $2n-2$, степінь $I_i(s)$ не вище $2n-2$.

Після визначення із (8) закону зміни $x(t)$ переміщення співударяючих мас можуть бути знайдені із рівнянь (8). В рівняннях (8) вирази типу $\Theta_{kk}(s)/\Psi(s) = L_{pq}(s)$ представляють собою оператори динамічної податливості лінійної частини системи, які зв'язують переміщення її p -ої маси із силою, прикладеною до q -ої маси

$$x_p(t) = L_{pq}(s)F_q(t) \quad (10)$$

причому $L_{pq}(s) \equiv L_{qp}(s)$. Оператор $L_{pq}(s)$ будемо називати оператором прохідної динамічної податливості. В силу лінійності співвідношення (10) вирази операторів $L_{pq}(s)$ співпадають із співвідношенням перетворень Лапласа для перетворювальних оператором $L_{pq}(s)$ функцій [5]

$$L_{pq}(s) = \frac{L(x_p(t))}{L(F_q(t))} = \frac{\int_0^{\infty} x_p(\tau) e^{-s\tau} d\tau}{\int_0^{\infty} F_q(\tau) e^{-s\tau} d\tau}$$

де L – оператор Лапласа. Тому із рівняння (10) ми отримуємо

$$x_p(t) = \int_0^t h_{pq}(t-\tau)F_q(\tau) d\tau \quad (11)$$

де імпульсна перехідна функція $h_{pq}(t)$ є згортокою інтеграла Лапласа від зображення динамічної податливості $L_{pq}(s)$ [1]



$$h_{pq}(t) = L^{-1}\{L_{pq}(s)\} = \frac{1}{2\pi j} \int_{\alpha-j\infty}^{\alpha+j\infty} L_{pq}(s) e^{st} ds, (t > 0) \quad (12)$$

де $j^2 = -1$, α – абсциса збіжності, яка вибирається так, щоб задовольнялася умова

$$\int_0^{\infty} |h_{pq}(t)| e^{-\alpha t} dt < \infty$$

Для систем із повною дисипацією можна прийняти $\alpha=0$. Тоді в даному випадку перетворення Лапласа при $s=j\omega$ переходить у перетворення Фур'є.

Оператори динамічної податливості можуть бути побудовані не тільки для систем із кінцевим числом степенів вільності, але й для континуальних систем, а також систем змішаної структури, які мають елементи із зосередженими і розподіленими параметрами [1].

Враховуючи залежності (10-12) перепишемо рівняння (8) таким чином

$$\begin{cases} x_k(t) = [L_{kk}(s) - L_{mk}(s)]\Phi[x(t), sx(t)] + L_{kk}(s)F_k(t) + L_{mk}(s)F_m(t); \\ x_m(t) = [L_{km}(s) - L_{mm}(s)]\Phi[x(t), sx(t)] + L_{km}(s)F_k(t) + L_{mm}(s)F_m(t). \end{cases}$$

Або після перетворення подібних складових

$$\begin{cases} x_k(t) = L_{kk}(s)[\Phi[x(t), sx(t)] + F_k(t)] + L_{mk}(s)[\Phi[x(t), sx(t)] + F_m(t)] \\ x_m(t) = L_{km}(s)[\Phi[x(t), sx(t)] + F_k(t)] + L_{mm}(s)[\Phi[x(t), sx(t)] + F_m(t)] \end{cases} \quad (13)$$

Таким чином, для опису взаємодії в ударній парі нарівні із силовою характеристикою $\Phi(x, sx)$ необхідно знання матриці операторів динамічних податливостей ударної пари $A(s)$

$$A(s) = \begin{vmatrix} L_{kk}(s) & L_{mk}(s) \\ L_{km}(s) & L_{mm}(s) \end{vmatrix} \quad (14)$$

Дана матриця симетрична $L_{12}(s) \equiv L_{21}(s)$. У випадку, якщо ці елементи ударної пари належать не зв'язаним системам, $L_{12}(s) \equiv 0$ і матриця (14) приймає діагональний вигляд. Введемо позначення $L_{kk}(s)F_k(t) + L_{mk}(s)F_m(t) = x_{k0}(t)$, $L_{km}(s)F_k(t) + L_{mm}(s)F_m(t) = x_{m0}(t)$ і перепишемо систему (13) наступним чином:

$$\begin{cases} x_k(t) = x_{k0}(t) + [L_{kk}(s) - L_{mk}(s)]\Phi[x(t), sx(t)] \\ x_m(t) = x_{m0}(t) + [L_{km}(s) - L_{mm}(s)]\Phi[x(t), sx(t)] \end{cases} \quad (15)$$

Залежності $x_{k0}(t)$ і $x_{m0}(t)$ визначають коливання елементів ударної пари при відсутності між ними ударної взаємодії і повністю характеризує прикладення до ударної пари зовнішнього збудження. В системі рівнянь (15) із другого рівняння віднімемо перше і приходимо до співвідношення для відносної координати x

$$x(t) + L(s)\Phi[x(t), sx(t)] = \sum_{i=1}^n B_i(s)F_i(t), \quad (16)$$

де $L(s) = L_{kk}(s) + L_{mm}(s) - 2L_{km}(s)$; $B_k(s) = L_{km}(s) - L_{kk}(s)$; $B_m(s) = L_{mm}(s) - L_{mk}(s)$.

Переходячи від операторного запису перетворення функції у часову область аналогічно (10), отримаємо із (15) нелінійне інтегральне рівняння, яке повністю описує процес зміни відносної координати $x(t)$ як в перехідних, так і у встановлених режимах

$$x(t) + \int_0^t h(t-\tau)\Phi[x(\tau), \dot{x}(\tau)]d\tau = \sum_{i=1}^n \int_0^t h_i(t-\tau)F_i(\tau)d\tau, \quad (17)$$

де $h(t) = L^{-1}\{L(s)\}$; $h_i(t) = L^{-1}\{B_i(s)\}$. Права частина рівняння (17) є заданою функцією часу, яка характеризує відносний рух елементів ударної пари при відсутності ударної взаємодії. Позначаючи її $\vartheta(t)$, маємо

$$x(t) + \int_0^t h(t-\tau)\Phi[x(\tau), \dot{x}(\tau)]d\tau = \vartheta(t) \quad (18)$$

Функція (18) є узагальненням віброударної взаємодії, що характеризується систематичними переходами від контактного до безконтактного руху ударної пари.

Узагальнюючи вищевказані теоретичні дослідження робочих процесів вібраційних машин (ВМ) та віброударних машин (ВУМ), можна зробити підсумок, що приведе нас до наступних ознак вібраційних режимів (ВР) та віброударних режимів (ВУР) (табл. 1) [5].

Необхідною умовою існування усіх вібраційних і віброударних процесів є наявність спільної характеристики $\Xi(t) = \Xi(t+T)$ ВМ та ВУМ, де T – період коливального руху системи. Причому для вібраційних машин дана умова являється достатньою. Характеристика $\Xi(t)$ ВМ та ВУМ для машин із силовим збудженням [6] може виражати як функцію збуджуючої сили $F(t)$, як результат дії робочого



зусилля гідроімпульсного привода, так і функцію переміщення робочого органу $x(t)$ для машин із кінематичним збудженням.

Таблиця 1

Основні технологічні процеси, в яких використовуються вібраційні і віброударні режими*

Вид режиму роботи ВМ та ВУМ	Необхідні умови виникнення ВР та ВУР роботи	Достатні умови виникнення ВР та ВУР роботи	Фазові площини вібраційних та віброударних режимів роботи	Функціональна характеристика вібраційного та віброударного режиму роботи	Приклади технологічних процесів
Вібраційний	$ \Xi(t) - \Xi(t + T(\varepsilon)) \leq \varepsilon,$ $\varepsilon \rightarrow 0.$			$a\ddot{x} + \Phi(\dot{x}, \ddot{x}) = F(t)$	Транспортування; обробка матеріалів, зневоднення; типові; ущільнення ґрунтів; випробування; масообмін
Віброударний	$ \Xi(t) - \Xi(t + T(\varepsilon)) \leq \varepsilon$ $\varepsilon \rightarrow 0.$	$F(t) = S\delta(t - t_0)$ $\omega > 5,6\omega_0.$		$\int_0^t h(t - \tau) \Phi[x(\tau), \dot{x}(\tau)] + x(t) = g(t)$	Забивання паль, рихлення ґрунтів, пісків; дроблення крупнокускових матеріалів; формоутворення, ущільнення, пресування непластичних порошкових матеріалів; ресурсні, форсовані та інші типові випробування; збирання врожаю фруктів і ягід.
		$-\Delta < x < \Delta.$			

*Джерело сформовано на основі [1].

Достатньою умовою існування усіх віброударних процесів можна розділити по відповідним типам технологічних машин [7, 8]. Для віброударних імпульсних машин (поштовховий режим роботи) [8, 9], достатньою умовою існування є імпульсна форма періодичної збуджуючої сили $F(t) = S\delta(t - t_0)$ на виконавчому органі, яка діє із частотою $\omega > 5,6\omega_0$, де ω_0 – частота вільних коливань виконавчого органу віброударної машини, δ – функція Дірака [6], S – імпульс збуджуючої сили $F(t)$. Для віброударних машин з обмеженням [7, 8], достатньою умовою є наявність жорсткого упору на відстані $0 < |\Delta| < a$, який обмежує вимушений коливальний рух виконавчого органу ВУМ амплітудою a і спричиняє його ударну взаємодію, яка характеризується коефіцієнтом відновлення R .

5. Висновок

Побудовано і проаналізовано єдину форму запису рівнянь рухів співударяючих елементів машин на всій часовій вісі, яким можна буде описати повну сукупність реалізованих рухів. Досягнуто це за допомогою введення нелінійних залежностей, що відображають процес силової взаємодії співударяння тіл або їх елементів.



Список літератури

1. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
2. Іскович-Лотоцький Р. Д. Основи теорії розрахунку та розробка процесів і обладнання для віброударного пресування: монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2006. – 338 с.
3. Севостьянов І. В. Математичне моделювання процесів віброударного сепарування вологих дисперсних матеріалів/ І. В. Севостьянов, Р. Д. Іскович-Лотоцький // Вібрації в техніці та технологіях, 2008. - №2. – С. 39 - 45.
4. Іскович-Лотоцький Р. Д. Підвищення ефективності функціонування вібропреса з гідроімпульсним приводом / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Вібрації в техніці та технологіях, 2015. – № 2(78). – С. 75 – 79.
5. Іскович-Лотоцький Р. Д. Дослідження основних робочих режимів інерційного вібропрес-молота з гідроімпульсним приводом / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська, Я. П. Веселовський // Вібрації в техніці та технологіях, 2017. - №2(85). – С. 43 – 46.
6. Iskovych-Lototsky R. Development of the evaluation model of technological parameters of shaping workpieces from powder materials / R. Iskovych-Lototsky, O. Zelinska, Y. Ivanchuk, N. Veselovska // East European Journal of advanced technologies, 2017. - № 1/1 (85). – С. 9 – 17.
7. Іскович-Лотоцький Р. Д. Технологія моделювання оцінки параметрів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом: монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький, О. В. Зелінська, Я. В. Іванчук. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 152 с.
8. Іскович-Лотоцький Р. Д. Оптимізація конструктивних параметрів інерційного вібропрес-молота / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський // Вісник машинобудування та транспорту, 2016. – №2. – С. 43 – 50.
9. Іскович-Лотоцький Р. Д. Математичне моделювання робочих процесів інерційного вібропрес-молота з електрогідравлічною системою керування гідроімпульсного привода для формоутворення заготовок з порошкових матеріалів / Р. Д. Іскович-Лотоцький, В. П. Міськов, Я. В. Іванчук // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, 2016. – №3(237). – С. 176 – 180.
10. Іскович-Лотоцький Р. Д. Моделювання робочих процесів гідроімпульсного привода з однокаскадним клапаном пульсатором / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський // Вібрації в техніці та технологіях, 2017. – № 3(86). – С. 10 – 19.

References

- [1] Korn H., Korn, T. (1974) *Spravochnyk po matematyke dlia nauchnykh robotnykov y ynzhenerov. [Mathematics Handbook for Scientists and Engineers]* Moscow: Nauka [in Russian].
- [2] Iskovych-Lototskyi, R. (2006) *Osnovy teorii rozrakhunku ta rozrobka protsesiv I obladnannia dlia vibro udarnoh opresuvannia [Fundamentals of calculation theory and development of processes and equipment for vibro-impact press]* Vinnytsya :UNIVERSUM–Vinnytsya [in Ukrainian].
- [3] Sevostianov, I., Iskovych-Lototskyi, R. (2008) *Matematychni modeliuvannia protsesiv vibroudarnoho separuvannia volohykh dyspersnykh materialiv [Mathematical modeling of the process of separation of the dispersed materials]*, 2, 39 – 45, *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh* [in Ukrainian].
- [4] Iskovych-Lototskyi, R., Veselovska, N., Zelinska, O. (2015) *Pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia vibro presa z hidro impulsnym pryvodom [Increase efficiency of vibration press with hydropulse drive]*, 2(78), 75–79, *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh* [in Ukrainian].
- [5] Iskovych-Lototsky, R., Veselovska, N., Zelinska, O. (2017). *Doslidzhennya osnovnykh robochykh rezhymiv inercijnogovibropr-es-molota z gidroimpul'snym pryvodom. [Investigation of the basic operating modes of inertial vibration press-hammer with a hydropulse drive]*, 2(78), 75 – 79, *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh* [in Ukrainian].
- [6] Iskovych-Lototsky, R., Zelinska, O., Ivanchuk, Y., Veselovska, N. (2017) Development of the evaluation model of technological parameters of shaping workpieces from powder materials, 2(85), 43 – 46, *East European Journal of advanced technologies*.
- [7] Iskovych-Lototskyi, R., Zelinska, O., Ivanchuk, Y. (2018) *Tekhnolohii a modeliuvannia otsinky parametriv formoutvorennia zahotovok z poroshkovykh materialiv na vibro presovomu obladnanni z*



hidro impulsnym pryvodom [Modeling technology for estimating the parameters of shaping of billets from powder materials on vibropress equipment with a hydropulse drive] Vinnytsya: VNTU [in Ukrainian].

- [8] Iskovych-Lototskyi, R., Ivanchuk, Y., Veselovskyi, Y. (2016) *Optimizatsiia konstruktyvnykh parametriv inertiinoho vibropres–molota [Optimization of design parameters of inertial vibration press-hammer]*, 2, 43 – 50, Visnyk mashynobuduvannia ta transport [in Ukrainian].
- [9] Iskovych-Lototskyi, R., Miskov, V., Ivanchuk, Y. (2016) *Matematychni modeliuvannia robochykh protsesiv inertiinoho vibropres–molota z elektro hidravlichnoiu systemoiu keruvannia hidroimpulsnoho pryvoda dlia formoutvorennia zahotovok z poroshkovykh materialiv [Mathematical modeling of working processes of inertial vibration press-hammer with electrohydraulic control system of a hydropulse drive for shaping of billets from powder materials]*, 3(237), 176 – 180, Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Khmelnytskyi: Serii: Tekhnichni nauky [in Ukrainian].
- [10] Iskovych-Lototskyi, R., Ivanchuk, Y., Veselovskyi, Y. (2017) *Modeliuvannia robochykh protsesiv hidroimpulsnoho pryvoda z odnokaskadnym klapanom pulsatorom [Simulation of working processes of a hydropulse drive with a single-stage valve with a pulsator]*, 3(86), 10–19, Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh [in Ukrainian].

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ РЕЖИМОВ ВИБРАЦИОННЫХ И ВИБРОУДАРНЫХ МАШИН

В предыдущих работах проводились исследования основных режимов инерционной нагрузки во время отработки технологических процессов формообразования заготовок из порошковых материалов способом виброударного прессования.

Конструктивное исполнение модели инерционного вибропресс-молота и описание ее параметров дает возможность выбора различных режимов прессования и позволяет оценить эффективность их применения.

Различные математические модели системы применялись при построении точных решений на этапах движения между ударами и в моменты соударений. Они описывались линейными дифференциальными уравнениями или конечными соотношениями стереомеханической теории удара, которые вводились в качестве граничных условий процесса. Целесообразно построить и проанализировать единую форму записи уравнений движений соударенных элементов машин на всей временной оси, которые описывают полную совокупность реализуемых движений. Это достигается посредством введения нелинейных зависимостей, отражающих процесс силового взаимодействия соударения или их элементов.

Ключевые слова: вибрационные машины, виброударные машины, гидропривод, эффективность, рабочие режимы прессования, виброударные прессования.

Рис. 2. Табл. 1. Ф. 18. Лит. 10.

MODELING OF OPERATING MODES OF VIBRATION AND VIBRATION DAMPING MACHINES

In previous studies, studies were conducted on the main modes of inertial load during the development of technological processes of forming blanks of powder materials by the method of vibro-impact pressing.

The design of the model of the inertial vibropress hammer and the description of its parameters makes it possible to select different pressing modes, to evaluate the effectiveness of their application.

Various mathematical models of the system were used in constructing exact solutions at the stages of movement between shocks and at the moments of spivudaryan. They were described by linear differential equations or finite ratios of stereomechanical theory of impact, which were introduced as boundary conditions of the process. It is advisable to build and analyze a single form of writing the equations of motion for the driving elements of machines on the entire time axis, which describe the complete set of realizable motions. This is achieved through the introduction of nonlinear relationships, reflecting the process of force interaction of the collision or their elements.

Key words: vibration machines, vibro-impact machines, hydraulic drive, efficiency, working modes of pressing, vibro-impact presses

Fig. 2. Tab. 1. F. 18. Ref. 10.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Веселовська Наталія Ростиславівна – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: wnatalia@ukr.net).



Зелінська Оксана Владиславівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Моделювання та інформаційних технологій в економіці» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: zeloksanavlad@gmail.com).

Іванчук Ярослав Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Галузевого машинобудування» Вінницького національного технічного університету (вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021, e-mail: ivanchuck@ukr.net).

Гнатюк Олена Федорівна – аспірантка першого року заочної форми навчання Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: Alenagnatiuk1@gmail.com).

Веселовская Наталия Ростиславовна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Машин и оборудования сельскохозяйственного производства» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: wnatalia@ukr.net).

Зелинская Оксана Владиславовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Моделирования и информационных технологий в экономики» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: zeloksanavlad@gmail.com).

Иванчук Ярослав Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Отраслевого машиностроения» Винницкого национального технического университета (ул. Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, Украина, 21021, e-mail: ivanchuck@ukr.net).

Гнатюк Елена Федоровна – аспирантка первого года заочной формы обучения Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: Alenagnatiuk1@gmail.com).

Veselovska Natalia – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of “Machinery and equipment in agricultural production” Vinnytsia National Agrarian University (Soniachna str., 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, E-mail: wnatalia@ukr.net).

Zelinska Oksana – PhD, Associate Professor of Department “Modeling and information technologies in economy” of Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnychna str., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: zeloksanavlad@gmail.com).

Ivanchuk Yaroslav – PhD, Associate Professor of the Department of “Branch Machine building” of Vinnytsia National Technical University (Khmelnyskeshose str., 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021, E-mail: ivanchuck@ukr.net).

Gnatyuk Olena – Graduate Student of the First Year of Correspondence Courses of Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnychna str., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: Alenagnatiuk1@gmail.com).