

**Омельянов О. М.**

асистент

**Замрій М. А.**

магістрант

*Вінницький національний  
аграрний університет***Omelyanov O.****Zamrii M.***Vinnitsa National Agrarian  
University***УДК 621.921****DOI: 10.37128/2306-8744-2020-4-6**

## **НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН**

У статті розглянуті напрямки підвищення ефективності роботи вібраційних технологічних машин. Обробка інформації про напрямки розвитку вібраційних технологій досить різноманітна та представлена численними науково-технічними розробками, пов'язаними з підвищенням ефективності роботи вібраційних машин та забезпеченням надійності їх роботи. Аналітичною основою проведення попередніх досліджень в створенні нової техніки є математичні моделі, що відображають властивості механічних коливальних систем з декількома ступенями свободи, які здійснюють малі коливання під дією системи періодичних зовнішніх збурень, що створюють вібраційні поля тієї чи іншої конфігурації. Динамічні властивості робочих органів машин в деталізованій формі розкриваються як розподіл амплітуд коливань точок робочих органів. У багатьох випадках такий розподіл носить лінійний характер, що пов'язано з проявами властивостей найпростіших рухів робочих органів. Пропонуються підходи, в рамках яких можливе структурне математичне моделювання реалізується на уявленні про те, що лінійна механічна коливальна система з зосередженими параметрами і декількома ступенями свободи, може бути порівняна зі структурною схемою системи автоматичного управління. Особлива увага при цьому приділяється вивченню та оцінці можливостей появи нових динамічних ефектів, пов'язаних з одночасною дією декількох робочих органів машин, а також - режимам динамічного гасіння коливань. Велику роль в забезпеченні таких розробок грають напрямки досліджень, орієнтовані на розробку методів математичного моделювання. На основі проведених досліджень показано, що вібраційне поле вібраційної технологічної машини формується під дією декількох факторів, які визначаються одночасністю спільної дії декількох силових збурень, несиметричністю інерційних та пружних властивостей механічної системи, наявністю додаткових зв'язків. Введення додаткових зв'язків в структуру механічної коливальної системи вібромашини, дозволяє істотно впливати на структуру вібраційного поля, надаючи можливості вибору умов раціональної організації технологічного процесу вібраційної обробки, наприклад, вібраційного зміцнення, дроблення, транспортування, просіювання.

**Ключові слова:** технологічні вібраційні машини, вібраційне поле, коливальна система, математична модель, виконавчий орган.



**Вступ.** Сучасні технологічні машини використовуються в різних галузях виробництва. Вібрації супроводжують функціонування багатьох машин, що пов'язано з особливостями взаємодії робочих органів з технологічним середовищем. Взаємодія елементів технічних об'єктів створює вібраційний простір локальних та загальних динамічних станів. Задачі динаміки машин різноманітні та мають свою специфіку, яка проявляється в можливості появи порушень та відмов у функціонуванні вузлів та агрегатів. Це вимагає особливої уваги в розробці принципів побудови раціональної роботи машин та їх вузлів, та оцінці динамічних можливостей для підтримки відповідного рівня динамічної якості на всіх стадіях робочого циклу технічних об'єктів, що працюють в складних динамічних умовах.

Сучасне машинознавство є теоретичною основою різних галузей машинобудування. Проблеми динаміки машин знайшли відображення в наукових працях багатьох вчених [3, 4, 6, 13, 14, 16].

В останні роки широке поширення отримали методи та підходи нелінійної динаміки машин. При цьому використовуються сучасні методи чисельного моделювання; застосовуються пакети прикладних програм. У багатьох випадках в якості розрахункових схем технічних об'єктів різного призначення використовуються механічні коливальні системи з декількома ступенями вільності. Такі системи мають розвинену структуру зв'язків, що відображає особливості динамічної взаємодії елементів та специфіку виникаючих форм динамічних режимів.

Однією з актуальних задач залишаються подальші дослідження в напрямку підвищення ефективності роботи вібраційних технологічних машин.

**Формування мети досліджень.** Метою досліджень є розробка методів побудови математичних моделей динамічного стану технологічних машин для формування структури вібраційних полів робочих органів, забезпечення надійності їх експлуатації та підвищення ефективності процесів.

**Виклад основного матеріалу.** Технологічні машини працюють з високою продуктивністю в умовах інтенсивного динамічного навантаження. Забезпечення високого рівня надійності та ефективності роботи машин є складною актуальною комплексною науково-технічною проблемою. Технічні об'єкти експлуатуються в умовах підвищених навантажень, що зумовлює підвищену увагу до динамічної якості машин на стадіях попередніх досліджень та оцінок, при

проведенні відповідних розрахунків та вибору раціональних конструктивно-технічних рішень.

Серйозні завдання [6, 7, 9] щодо забезпечення надійності технічних систем пов'язані з необхідністю посилення вимог до роботи устаткування та апаратури при підвищених рівнях вібрацій. Виникаючі при цьому науково-технічні проблеми вимагають деталізації уявлень про особливості динамічних процесів та розвитку методологічних основ оцінки динамічних станів.

Технологічні вібраційні машини використовуються в багатьох галузях промисловості та представлені різними типами віброзмішувачів, сепараторів, дробарок, віброуцілювачів, транспортерів та ін. Завданням динаміки таких машин, підвищенню надійності експлуатації їх роботи, створенню теоретичного базису їх розрахунку та конструювання присвячені роботи Блехмана І.І., Биховського І.І., Гончаревича І.Ф., Ганієва Г.Е., Заїки П.М., Кармазіна В.Д., Ловейкіна В.С., Опирського Б.Я., Повідайло В.А. та ін.

Велика увага приділяється розвитку підходів, що враховують специфіку технічних об'єктів, умови їх навантаження, вимоги до якості роботи та безпеці їх експлуатації.

В цьому напрямку інтерес представляє порівняльний огляд у декількох аспектах проблематики з урахуванням специфіки об'єктів, умов їх навантаження та вимог до динамічної якості їх роботи.

В теорії технологічних вібраційних машин в якості їх розрахункових схем розглядаються механічні коливальні системи з декількома ступенями вільності. У таких системах робочий орган машин може бути представлений як тіло, що має відповідну систему пружних зв'язків, що забезпечують можливість просторових рухів. У такій постановці завдання руху твердого тіла при дії періодичних зовнішніх впливів знайшли відображення в роботах [2, 7, 8, 12], в яких пропонуються узагальнені підходи для побудови математичних моделей.

Особливості математичних моделей твердого тіла, на пружних опорах, полягають в тому, що об'єкт, динамічний стан якого оцінюється, може бути представлений твердим тілом, а його інерційні властивості при обертальному русі щодо осей координат можуть бути визначені аналітично або експериментально. Найбільш часто для складання математичних моделей застосовують спеціальні системи координат [2, 8, 9], а також системи координат, що враховують особливості руху конкретних технічних об'єктів.

У розвиток теоретичної основи, в рамках якої було використано особливості



технологічних машин різного призначення, великий внесок надано роботами [7, 9, 15] та ін. Результати конкретних науково-технічних та конструкторсько-технологічних розробок, використання яких справило значний вплив на теорію та практику вирішення різних завдань динаміки машин, знайшли також відображення в роботах [7, 9, 15]

Більшість технічних об'єктів промислового використання в задачах динаміки розглядається в спрощеному вигляді, хоча це і не виключає інтересу та ініціатив щодо розширення та деталізації методологічної бази, в плані розвитку нових напрямків математичного моделювання, що використовують аналогії електромеханічної природи, принципи побудови систем автоматичного управління та ін. [1-15]. Технологія побудови математичних моделей передбачає вибір та обґрунтування системи координат, найбільш повно відповідаючих поставленому завданню дослідження з урахуванням специфічних особливостей динамічних властивостей об'єкта. У багатьох випадках конкретних технічних завдань розглядаються системи з зосередженими параметрами, що володіють лінійними властивостями елементів при малих коливаннях щодо положення стійкої рівноваги.

Після вибору системи або систем узагальнених координат для побудови математичних моделей формуються вирази для кінетичної та потенційної енергій, визначаються узагальнені сили [17]; після чого, при використанні рівняння Лагранжа другого роду формується математична модель. У разі необхідності, враховуються і сили опору, які приводяться до виду сил в'язкого тертя. Однак, найчастіше, на перших та попередніх етапах досліджень сили опору встановлюються малими і їх облік проводиться окремо та вибірково, після попередньої загальної оцінки особливостей динамічного стану, що формується тільки з урахуванням пружних зв'язків системи, в цілому [12].

У загальному випадку математична модель твердого тіла являє собою систему з шести пов'язаних диференціальних рівнянь другого порядку, що ускладнює вирішення більшості задач динаміки. При виборі нормальних координат вихідна математична модель розпадається на шість незалежних диференціальних рівнянь другого порядку. При цьому до нормальних координатах наводяться і узагальнені сили. Такий підхід дозволяє реалізувати ідеї управління рухом, в цілому, через ініціацію відповідних силових факторів, що прикладаються до системи через нормальні координати. Такі підходи дозволяють деталізувати уявлення про вільні коливання

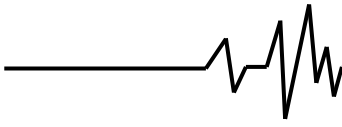
системи, формах їх руху, а також отримувати інформацію про розподіли амплітуд коливань при реалізації головних рухів. В цілому, така методологія, цілком раціональна, і дозволяє знаходити ефективні рішення у виборі та забезпеченні режимів роботи вібраційних машин.

Істотне полегшення у вирішенні завдань динамічного створення віброзахисних систем, розробки вібраційного технологічного обладнання мають напрямки, в рамках яких знижується число ступенів вільності руху об'єкта. Це пов'язано з певними прийомами розміщення мас об'єкта щодо центру ваги, а також - від виконання певних вимог до сумарних значень силових чинників, які забезпечують як поступальні, так і просторові коливальні рухи об'єкта.

Велике значення для вирішення завдань формування певних динамічних станів, в тому числі і таких, коли увага приділяється створенню руху по певній координаті без внесення збурень в рух по іншим координатам. Такі завдання характерні для вібраційних технологічних машин, в яких технологічний процес з необхідними параметрами якості, повинен формуватися в заданому та певному напрямку. У роботах [12, 16, 18] сформульовані поняття про осях жорсткості, площині та центрах жорсткості. У ряді робіт розглядаються такі поняття як осі, площини та центри пружності. Важливою для подальших досліджень є оцінка можливостей створення та використання в технологічних машинах такого руху об'єкта, який визначається однорідністю форм вібраційного поля, розподілом амплітуд коливань точок робочого органу вібромашини.

Одним з напрямків проектування машин, обладнання та приладів, що працюють в умовах інтенсивного динамічного навантаження, є відповідне взаємне розташування осей жорсткості, а також центрів жорсткості та центрів мас. Узагальнений підхід до оцінки можливостей налаштування динамічного стану представляють форми спільних рухів за певними координатами. Такі ситуації особливо характерні для вібраційних технологічних машин, в яких робочий орган може одночасно брати участь в поступальному та обертальному рухах в одній площині, що зумовлює отримання певних динамічних ефектів. У подібного роду випадках можлива поява центрів коливань, в яких амплітуди коливань робочого органу можуть брати нульові значення. Ряд питань в цьому напрямку знайшли відображення в роботах [2, 4, 7, 9, 10].

У меншій мірі знайшли відображення в науковій літературі ефекти спільних рухів поступального, обертального з паралельними осями або осями, що збігаються. В цьому



напрямку відомими стали роботи [10,15]. Специфічні властивості мають об'єкти, які здійснюють одночасне обертання навколо осей обертання, що перетинаються, в тому числі і взаємно-перпендикулярних, що призвело до розвитку теорії гіроскопічних систем.

До числа маловивчених питань в динаміці механічних коливальних систем можна віднести введення та використання в структурах механічних коливальних систем додаткових зв'язків, що реалізуються різними пасивними та активними пристроями, хоча в цьому напрямку намічається певне зростання інтересу до можливостей появи нових динамічних ефектів [2, 3, 13, 15, 17].

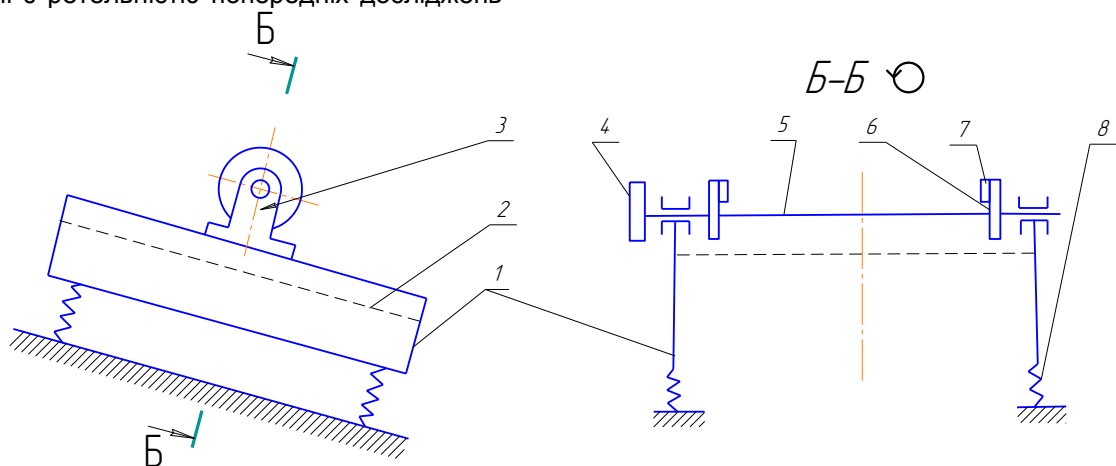
Динаміка систем з декількома ступенями свободи відрізняється великою різноманітністю відгуків на зміни параметрів системи, але не тільки цим, оскільки зв'язок рухів по окремим координатам зумовлює ефекти від спільності або одночасності дії кількох силових факторів, які можуть інтерпретуватися як відповідні зміни параметрів вихідної системи. В цьому плані можливі розробки нових підходів, як щодо технологічних вібраційних машин, так і до завдань динаміки транспортних систем [8, 15].

Багато технологічних машини, призначені для реалізації вібраційних технологічних процесів, в яких здійснюються різні режими взаємодії деталей з робочим середовищем; реалізується вібраційне транспортування, переміщення деталей, класифікація та сортування сипучих матеріалів та ін. [2, 7, 8, 11, 16]. Надійність роботи таких машин, ефективність їх експлуатації істотно пов'язані з ретельністю попередніх досліджень

та розробок, що забезпечують відповідний рівень конструкторсько-технічних рішень [5, 6]. Це пов'язано, особливо на перших стадіях розробки машин, зі створенням відповідних математичних моделей, що показують специфіку роботи вузлів, агрегатів та деталей машин.

Робочі органи машин часто інтерпретуються як тверді тіла з двома та більше ступенями свободи, а взаємодія елементів розглядається як зв'язок різних типів (пружні, дисипативні, інерційні). Оцінка динамічних властивостей таких систем проводиться при обліку силових та кінематичних факторів, що відображають особливості технологічних процесів, що реалізуються робочими органами.

Вібраційні технологічні машини для роботи з сипучими матеріалами використовуються в багатьох галузях промисловості, відрізняються простотою та високою продуктивністю. В останні роки велика увага приділяється сепараторам, ефективність яких залежить від поєднання параметрів налаштування пружної коливальної системи на певні амплітуди та частоти коливань робочого органу. При цьому виникає проблема формування вібраційних полів цих машин [11, 13]. З технічної точки зору сепаратори представляють собою технічні об'єкти, кожен з яких є механічною коливальною системою у вигляді твердого тіла, що опирається на опорну поверхню пружними елементами. Збудження коливань елементів сепаратора здійснюється інерційними віброзбуджувачами (рис. 1). [9].

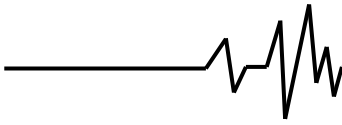


**Рис. 1. Схема вібраційного сепаратора з інерційним (простим дебалансним) віброзбуджувачем:**

1 – короб; 2 – сито; 3 – підшипникова опора; 4 – шків; 5 – вал; 6 – маховик; 7 – дебаланс; 8 – пружина (опора)

В інерційних машинах коливання робочого органу створюються інерційними силами, що виникають при обертанні вала

віброзбудника, що представляє собою ротор з невідбалансованою масою (дебаланс). Перевагою інерційних приводів є можливість



створення великих амплітуд коливання, простота конструкції та експлуатації [9]. Для забезпечення стійкості роботи (сталість амплітуди коливання при зміні будь-яких параметрів системи) для вібраційних транспортерів з інерційним приводом використовується зарезонансна настройка.

Важливим для налаштування сепаратора є вибір параметрів розподілу амплітуд коливань точок робочого органу. Рух матеріалу по робочій поверхні визначається коефіцієнтом вібротранспортування, що залежить від відношення нормальної складової амплітуди прискорення робочої поверхні до складової прискорення земного тяжіння [15]. Такий коефіцієнт можна записати у вигляді виразу

$$K = (A\omega^2 \sin\beta) / (g \cos\alpha) \quad (1)$$

Для забезпечення більшої інтенсивності процесу, коливання робочої поверхні сепаратора створюють режими вібраційного переміщення з відривом матеріалу від робочої поверхні. Рівняння руху за аналогією з [8] мають вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} \ddot{x} &= A\omega^2 \cos\beta \sin\omega t + g \sin\alpha, \\ \ddot{y} &= A\omega^2 \cos\beta \sin\omega t - g \sin\alpha, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

де  $A$  та  $\omega$  - амплітуда та частота коливань робочої поверхні.

Приклади рішення рівняння (2) наводяться в [8], що формує, по суті, вимоги до динамічних властивостей вібраційних технологічних машин. У роботах [13,14] наводяться конкретні дані, що дають уявлення про амплітудах та частотах коливань машин. В процесі роботи у сепаратора з інерційним

вібробудувачем параметри коливань можуть істотно залежати від величини технологічного навантаження. Це залежить від висоти шару технологічного навантаження та може бути досить відчутним.

При розробці вібраційних технологічних машин необхідно враховувати, що створюване вібраційне поле повинно забезпечувати також і переміщення робочої суміші зі змінною висотою шару; це вимагає забезпечення спільності роботи елементів технологічного комплексу [12, 13].

Зміна параметрів вібраційного поля сепараторів забезпечується конструктивно-технічними заходами, шляхом вибору місць розташування пружних елементів, нахилу направляючих та вибору відповідних параметрів елементів систем [8, 9]. Такі підходи вимагають розробки спеціальних способів та засобів зміни динамічних станів робочих органів [14].

Формування вібраційного поля визначається не тільки розподілом масоінерційних параметрів, але і залежить від способу збудження коливань робочого органу (наприклад, при дії двох збудників коливань).

Ускладнення форм руху робочих органів. Оцінка ефективності роботи вібраційних технологічних машин базується на використанні узагальнених математичних моделей, які засновані на узагальнених розрахункових схемах. Приклади таких схем наведені на рис. 2 [8].

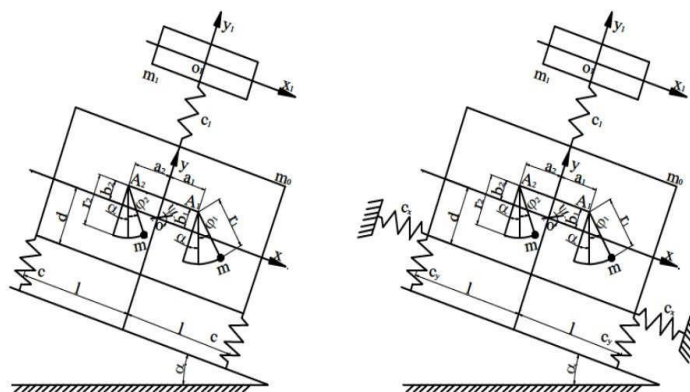


Рис. 2. Узагальнена розрахункова схема вібраційного сепаратора

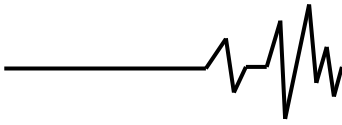
В якості узагальнених координат системи обрані  $[x, y, \psi, \varphi_1, \varphi_2, x_1, y_1]$ ; для складання використовується рівняння Лагранжа другого роду.

Це дозволяє отримати детальну математичну модель системи з урахуванням її структури.

Введення додаткових зв'язків в структуру вібраційних технологічних машин

дозволяє розширити області пошуку підходів у підвищенні продуктивності машин [7, 12, 17]. Однією з проблем поліпшення вібраційних машин є забезпечення необхідних режимів коливань при одночасному зниженні енергоспоживання та динамічних навантажень

на основу. Широко представлені машини, виконані на основі одномасової динамічної



схеми з односпрямованим збудженням коливань робочого органу в зарезонансного режимах.

Можливий напрямок досліджень для вирішення цієї проблеми полягає в застосуванні багатомасових, наприклад двомасових, динамічних схем вібраційних машин. Відомо [11,15], що введення додаткової маси підвищує динамічну врівноваженість машини, покращує її віброізоляцію; це дозволяє роботу машини на резонансних або близькорезонансних режимах [9,10].

В [14] показано, застосування двомасової динамічної схеми машини, в якій робочий орган (верхня маса) встановлено на проміжній масі, до якої безпосередньо прикладається збуджуюча сила. Така схема збудження коливань машини, в порівнянні зі схемою з одним віброзбуджувачем, призводить до звуження частотної області, в якій застосування двомасової схеми дозволяє досягти істотного зниження динамічних зусиль, переданих на основу, в порівнянні з одномасовою схемою. Системи з багатомасовим збудженням вібростенда при жорстких кінематичних зв'язках розглянуті в роботах [6,7].

В тематиці теоретичних та прикладних задач динаміки вібраційних технологічних машин велика увага приділяється способам та формам реалізації збудження вібрацій. Робочий орган вібраційної технологічної машини може приводитися в стаціонарний рух не тільки одним джерелом; їх може бути декілька [9]. У технологічних машинах вібраційного принципу дії можуть використовуватися резонансні режими [10]. Однак забезпечення стабільності та стійкості роботи вимагає певних додаткових зусиль.

Для збудження односпрямованих вертикальних коливань застосовуються парне число дебалансних вібровозбуджувачів (рис. 3). Такі збуджувачі встановлюються на жорсткій платформі симетрично щодо її центру мас. Рух вібровозбуджувачів створюється в протилежних напрямках. Повний рух системи з урахуванням неврівноваженості описується п'ятьма узагальненими координатами: лінійними переміщеннями центру мас платформи в напрямку осей  $Oy$  та  $Ox$ , кутом повороту платформи  $\varphi$  та кутами повороту роторів електродвигунів  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$ .

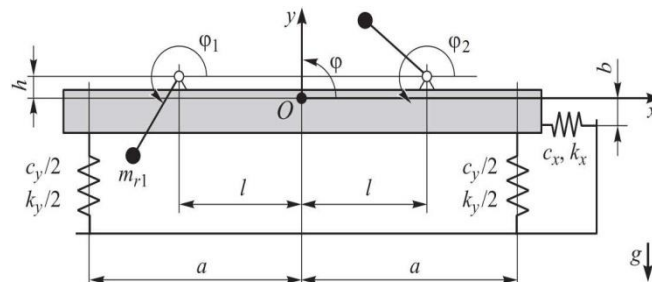


Рис. 3. Розрахункова схема системи

Наведені матеріали відображають розвиток підходів, пов'язаних з управлінням динамічними станами механічних коливальних систем. Подібного роду підходи характерні і для систем автоматичного управління віброзахисними системами, а також використовуються в динаміці складних транспортних об'єктів [4, 5, 14].

Пошуки економічних способів вібраційного збудження робочих органів вібраційних технологічних машин пов'язані з розробкою ідей застосування ефектів параметричних резонансів. В [9] наводяться оригінальні ідеї та пропозиції щодо розширення можливостей управління технологічними процесами; в [14] досліджується збудження параметричних резонансних кругових коливань робочого органу вібраційної машини з нерухомою основою.

В роботі [14] досліджується динаміка роторно-маятникової системи параметричного

приводу машини, робочий орган якої має дві ступені свободи (рух в двох взаємоперпендикулярних напрямках по осях  $x$ ,  $y$ ).

Розвиток вібраційної техніки та технології стимулює пошуки та розробки в галузі прикладної теорії коливань. Оцінка

динамічних властивостей технічних об'єктів по їх розрахунковими схемами у вигляді механічних коливальних систем, пов'язана з увагою до таких понять як осі жорсткості системи, центри жорсткості, центри та вузли коливань, що знайшло відображення в роботах [9, 11].

Багато технічних об'єктів, що використовуються в різних виробництвах, є технологічні машини, транспортні засоби та пристрої. Забезпечення надійності роботи машин та устаткування, забезпечення якості виробленої продукції та послуг, створення комфортних умов для роботи обслуговуючого



персоналу, є важливими та актуальними проблемами, що виникають на всіх стадіях робочого циклу машин.

Особливе значення мають етапи створення машин, коли відпрацьовуються принципи побудови технічних об'єктів, визначаються основні параметри динамічної якості машин, їх можливості забезпечення безвідмовної роботи при підвищених навантаженнях та дії непередбачених факторів. Практика інженерних розробок заснована на попередньому аналізі та оцінці динамічних можливостей технічних об'єктів, які розглядаються як деякі механічні коливальні системи з декількома ступенями свободи з визначенням основних елементів, взаємодіючих між собою. Попереднє спрощення уявлень про роботу технічного об'єкта дозволяє, в кінцевому підсумку, перейти до формалізованих методів опису станів об'єктів, відобразити їх за допомогою математичних моделей, у вигляді систем диференціальних рівнянь. Наявність математичної моделі зумовлює можливості використання засобів обчислювальної техніки, в тому числі, методів чисельного моделювання, реалізованих за допомогою пакетів прикладних програм.

Як показала обробка інформаційних матеріалів про особливості технологічних машин переробної, гірничодобувної галузі, будівельної індустрії, таке обладнання як вібраційні столи, вібраційні транспортери, вібросепаратори, класифікатори можуть при розробках та розрахунках відобразитися механічними коливальними системами з масоінерційними пружними ланками, а також додатковими зв'язками, які реалізуються, в свою чергу, різними механізмами [12].

Введення розрахункових схем дає можливість деталізувати уявлення про особливості динамічних властивостей, які можуть бути представлені наведеними масами, динамічною жорсткістю окремих вузлів та агрегатів машин, а також додатковими зв'язками. Велике значення для оцінки динамічних властивостей технічних об'єктів має врахування особливостей роботи так званих робочих органів, які можуть здійснювати складні рухи [16].

По суті, багато завдань динаміки машин в своїй постановці досліджень та розробці різних рівнів деталізації уявлень орієнтовані на виділення об'єкта, динамічний стан якого оцінюється, а також - на особливості технічної реалізації певної системи, що створює умови для виявлення різного роду зв'язків, контактів з навколишнім середовищем, формуванням зовнішніх та внутрішніх збурень, що визначають динамічний стан. Поняття системи передбачає

наявність типових ланок різної природи (пружні, дисипативні, інерційні). Форми самоорганізації руху елементів, що виникають при визначенні узагальнених уявлень у вигляді наведених мас, наведених жорсткостей, розподілу амплітуд коливань, появи динамічних ефектів, пов'язаних зі збільшенням, зменшенням або стабілізацією параметрів руху. Комплекс завдань подібного роду, способи та засоби оцінки, контролю та зміни динамічних станів характерні також і для завдань вібраційного захисту та віброізоляції технічних об'єктів. Такі завдання, в певному сенсі, є важливими завданнями динаміки машин. Багато фундаментальних проблем таких підходів було представлено в роботах [2-14].

Технологічні вібраційні машини часто відображаються системами з двома та трьома ступенями вільності з відповідною формою та структурою об'єкта, зокрема, домінують розрахункові схеми у вигляді твердих тіл з двома ступенями свободи на пружних опорах. Вибір систем координат дозволяє ефективно відображати та враховувати особливості різних зв'язків, в тому числі при введенні в структуру системи механізмів, пристроїв для перетворення руху. Структурне математичне моделювання дозволяє відобразити важливі властивості механічних коливальних систем, спільну дію кількох сил, можливості реалізації нових динамічних ефектів.

Проведений огляд показав, сучасні тенденції в розвитку теоретичного базису сучасного машинознавства, в тому числі і в досить стійкій тенденції на увагу до попередніх тадій дослідження, аналізі та динамічному синтезі систем, зведенню завдань динаміки до спрощених схем, що дозволяє застосування аналітичного апарату теорії коливань, теорії ланцюгів, теорії автоматичного управління.

#### Список використаних джерел

1. Вібрації в техніке: Справочник. В 6-ти т. Т.4. Вибрационные процессы и машины. Под ред. Э. Э. Лавендела. М.: Машиностроение. 1981. С. 509.
2. Блехман И. И., Джанелидзе Г. Ю. Вибрационное перемещение. М.: Наука. 1964. С.410.
3. Блехман И. И. Что может вибрация: о «вибрационной механике» и вибрационной технике. М.: Наука. 1988. С.208.
4. Берник П. С., Ярошенко Л. В. Вибрационные технологические машины с пространственными колебаниями рабочих органов. ВГСХИ. Винница. 1998. С. 116.
5. Берник П. С., Паламарчук И. П., Омелянов О. Н. Разработка вибрационного грохота с пространственными колебаниями



рабочих органов. *Вибрации в технике и технологиях*. 1998. № 2(6). С. 8–13.

6. Конради В. Я., Марковский Ф. И., Потураев В. Н., Франчук В. П., Мунтян В. И. Опыт применения резонансных грохотов на углеобогатительной фабрике. *Кокс и химия*. 1964. №8. С. 53–56.

7. Гортинский В. В., Демской А. В., Борискин М. А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос. 1980. С. 304.

8. Франчук В. П. Инженерные методы расчета и выбора динамических параметров вибрационных грохотов, конвейеров, питателей. Днепропетровск: *Збагачення корисних копалин. Науковотехнічний збірник*. 2001. № 12 (53). С. 126–143.

9. Пановко Г. Я., Шохин А. Е., Еремейкин С. А. Об одной задаче настройки вибрационных машин на резонансный режим. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2017. № 4. С. 106–111.

10. Елисеев С. В., Елисеев А. В., Миронов А. С. Возможности изменения вибрационного поля рабочих органов технологических машин. *Journal of Advanced Research in Natural Science*. 2018. № 9–1. С. 73–79.

11. Заика П. М. Определение законов движения рабочих органов пространственных вибрационных машин. *Вибрации в технике и технологиях*. 2002. № 4 (25). С. 17–25.

12. Ганиев Р. Ф., Кононенко В. О. Колебания твердых тел. М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы. 1976. С. 432.

13. Потураев В. Н., Франчук В. П., Надутый В. П. Вибрационная техника и технологии в энергоемких производствах. Днепропетровск: НГА Украины. 2002. С. 190.

14. Чубик Р. В. Керовані вібраційні технологічні машини. Монографія. Вінниця: ВНАУ. 2011. С. 355. ISBN 978-966-2462-35-7;

15. Повідайло В.О. Вібраційні процеси та обладнання. Львів. Видавництво НУ "Львівська політехніка". 2004. С. 248.

16. Омельянов О. М. Анализ приводных механизмов сепаратора комбикормов. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. № 2(85). С. 121-128.

17. Опирский Б. Я., Денисов П. Д. Новые вибрационные станки: конструирование и расчёт. Львов: Світ. 1991. С. 160.

18. Елисеев С. В., Артюнин А. И. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем. Новосибирск: Наука. 2016. С. 459.

## References

1. Vibratsii v tekhnike: Spravochnik. V 6-ti t. T.4. Vibratsionnyye protsessy i mashiny. Pod red. E. E. Lavendela. (1981). M.: Mashinostroyeniye. [in Russian]

2. Blekhman, I. I., Dzhanelidze, G. Yu. (1964). Vibratsionnoye peremeshcheniye. Moskva: Nauka [in Russian]

3. Blekhman, I. I. (1988). Chto mozhet vibratsiya: o «vibratsionnoy mekhanike» i vibratsionnoy tekhnike. M.: Nauka. [in Russian]

4. Bernik, P. S., Yaroshenko, L. V., (1998). Vibratsionnyye tekhnologicheskkiye mashiny s prostranstvennyimi kolebaniyami rabochikh organov [Vibrating technological machines with spatial oscillations of workinbodies]. VGSKhI. Vinnitsa. [in Russian]

5. Bernik, P. S., Palamarchuk, I. P., Omelianov, O. N. (1998). Razrabotka vibratsionnogo grokhota s prostranstvennyimi kolebaniyami rabochikh organov [Development of a vibrating screen with spatial oscillations of working organs]. *Vibratsii v tekhnike i tekhnologiyakh*. 2(6). 8–13. [in Russian]

6. Konradi V. Ya., Markovskiy, F. I., Poturayev, V. N., Franchuk, V. P. (1964). Muntyan V. I. Opyt primeneniya rezonansnykh grokhotov na ugleobogatitelnoy fabrike [The experience of using resonant screens in a coal preparation plant]. *Koks i khimiya- Coke and chemistry*, 8. 53–56. [in Russian]

7. Gortinskiy, V. V., Demskoy, A. V., Boriskin, M. A. (1980). Protsessy separirovaniya na zernopererabatyvayushchikh predpriyatiyakh. M.: Kolos.

8. Franchuk, V. P. (2001). Inzhenernyye metody rascheta i vybora dinamicheskikh parametrov vibratsionnykh grokhotov. konveyerov. pitatelye. *Dnepropetrovsk: Zbagachennyya korisnikh kopalin. Naukovotekhnichnyy zbirnik*, 12(53). 126–143. [in Russian]

9. Panovko, G. Ya., Shokhin, A. E., Eremeykin, S. A. (2017). Ob odnoy zadache nastroyki vibratsionnykh mashin na rezonansnyy rezhim. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye*, 4. 106–111. [in Russian]

10. Eliseyev, S. V., Eliseyev, A. V., Mironov, A. S. (2018). Vozmozhnosti izmeneniya vibratsionnogo polya rabochikh organov tekhnologicheskikh mashin. *Journal of Advanced Research in Natural Science*, 9–1. 73–79. [in Russian]

11. Zaika, P. M. (2002). Opredeleniye zakonov dvizheniya rabochikh organov prostranstvennykh vibratsionnykh mashin. *Vibratsii v tekhnike i tekhnologiyakh*, 4(25). 17–25. [in Russian]

12. Ganiyev, R. F., Kononenko, V. O. (1976). Kolebaniya tverdykh tel. M.: Nauka. glavnyaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy





literatury. [in Russian]

13. Poturayev, V. N., Franchuk, V. P., Naduty, V. P. (2002). *Vibratsionnaya tekhnika i tekhnologii v energoyemkikh proizvodstvakh*. Dnepropetrovsk: NGA Ukrainy. [in Russian]

14. Chubyk, R. V. (2011). *Kerovani vibratsiini tekhnolohichni mashyny*. Monohrafiia. Vinnytsia. VNAU. ISBN 978-966-2462-35-7. [in Ukrainian]

15. Povidailo, V.O. (2004). *Vibratsiini protsesy ta obladnannia*. Lviv. Vydavnytstvo NU "Lvivska politehnika". [in Ukrainian]

16. Omelianov, O. M. (2017). *Analiz pryvodnykh mekhanizmiv separatora kombikormiv. Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, 2(85). 121-128. [in Ukrainian]

17. Opirskiy, B. Ya., Denisov, P. D. (1991). *Novyye vibratsionnyye stanki: konstruirovaniye i raschet*. Lvov: Svit. [in Russian]

18. Eliseyev, S. V., Artyunin, A. I. (2016). *Prikladnaya teoriya kolebaniy v zadachakh dinamiki lineynykh mekhanicheskikh sistem*. Novosibirsk: Nauka. [in Russian]

#### DIRECTIONS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF VIBRATION TECHNOLOGICAL MACHINES

The article considers the directions of increasing the efficiency of vibrating technological machines. The processing of information on the development of vibration technologies is quite diverse and is represented by numerous scientific and technical developments related to improving the efficiency of vibration machines and ensuring the reliability of their work. The analytical basis for previous research in the creation of new technology are mathematical models that reflect the properties of mechanical oscillatory systems with several degrees of freedom, which perform small oscillations under the action of a system of periodic external perturbations that create vibration fields of one configuration. The dynamic properties of the working bodies of machines in a detailed form are revealed as the distribution of the amplitudes of oscillations of the points of the working bodies. In many cases, this distribution is linear, which is due to the manifestations of the properties of the simplest movements of the working bodies. Approaches are proposed in which the possible structural mathematical modeling is realized on the idea that a linear mechanical oscillatory system with concentrated parameters and several degrees of freedom can be compared with the structural scheme of the automatic control system. Particular attention is paid to the study and evaluation of the possibility of new dynamic effects associated with the simultaneous action of several working bodies of machines, as well as - modes of dynamic damping of oscillations. An important role in ensuring such

developments is played by areas of research focused on the development of methods of mathematical modeling. Based on the research it is shown that the vibration field of the vibrating technological machine is formed under the influence of several factors, which are determined by the simultaneous action of several force perturbations, asymmetry of inertial and elastic properties of the mechanical system, the presence of additional connections. The introduction of additional links in the structure of the mechanical oscillating system of the vibrating machine, can significantly affect the structure of the vibration field, providing the choice of conditions for rational organization of the technological process of vibration processing, such as vibration hardening, crushing, transportation, screening.

**Key words:** *technological vibrating machines, vibrating field, oscillating system, mathematical model, executive body.*

#### НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВИБРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

В статье рассмотрены направления повышения эффективности работы вибрационных технологических машин. Обработка информации о направлениях развития вибрационных технологий достаточно разнообразна и представлена многочисленными научно-техническими разработками, связанными с повышением эффективности работы вибрационных машин и обеспечением надежности их работы. Аналитической основой проведения предыдущих исследований в создании новой техники являются математические модели, отражающие свойства механических колебательных систем с несколькими степенями свободы, которые осуществляют малые колебания под действием системы периодических внешних возмущений, создают вибрационные поля той или иной конфигурации. Динамические свойства рабочих органов машин в детализированной форме раскрываются как распределение амплитуд колебаний точек рабочих органов. Во многих случаях такое распределение носит линейный характер, что связано с проявлениями свойств простейших движений рабочих органов. Предлагаются подходы, в рамках которых возможно структурное математическое моделирование реализуется на представлении о том, что линейная механическая колебательная система с сосредоточенными параметрами и несколькими степенями свободы, может быть сопоставима со структурной схемой системы автоматического



управления. Особое внимание при этом уделяется изучению и оценке возможностей появления новых динамических эффектов, связанных с одновременным действием нескольких рабочих органов машин, а также - режимам динамического гашения колебаний. Большую роль в обеспечении таких разработок играют направления исследований, ориентированные на разработку методов математического моделирования. На основе проведенных исследований показано, что вибрационное поле вибрационной технологической машины формируется под действием нескольких факторов, определяемых одновременно совместного действия нескольких силовых возмущений,

несимметричностью инерционных и упругих свойств механической системы, наличием дополнительных связей. Введение дополнительных связей в структуру механической колебательной системы Вибромашины, позволяет существенно влиять на структуру вибрационного поля, предоставляя возможности выбора условий рациональной организации технологического процесса вибрационной обработки, например, вибрационного укрепления, дробление, транспортировки, просеивания.

**Ключевые слова:** технологические вибрационные машины, вибрационное поле, колебательная система, математическая модель, исполнительный орган.

#### **Відомості про авторів**

**Омельянов Олег Миколайович** – асистент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету. Службова адреса: м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ 21008

**Омельянов Олег Николаевич** – асистент кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета. Служебный адрес: г. Винница, ул. Солнечная 3, ВНАУ 21008

**Omelyanov Oleg** – Assistant of the Department of General Technical Disciplines and Occupational Safety of Vinnitsa National Agrarian University, service address: Vinnitsa st. Sonyachna 3, VNAU 21008

**Замрій Михайло Анатолійович** – магістрант 1 року навчання спеціальності « 208 Агроінженерія», Інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [zamrij99@gmail.com](mailto:zamrij99@gmail.com)).

**Замрий Михаил Анатольевич** - магистрант 1 года обучения специальности «208 Агроинженерия», Инженерно-технологического факультета Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: [zamrij99@gmail.com](mailto:zamrij99@gmail.com)).

**Zamrii Mykhailo** - 1st year master's student majoring in 208 Agroengineering, Faculty of Engineering and Technology, Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna Street, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [zamrij99@gmail.com](mailto:zamrij99@gmail.com)).