



УДК 621.921

DOI: 10.37128/2520-6168-2021-3-9

**СУЧАСНИЙ СТАН НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РОЗРОБОК В ОБЛАСТІ ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ ВІБРАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

Омельянов Олег Миколайович, асистент
Твердохліб Ігор Вікторович, к.т.н., доцент
Вінницький національний аграрний університет

Oleh Omelyanov, assistant
Igor Tverdohleb, Ph.D., Associate Professor
Vinnitsa National Agrarian University

У статті розглянуто стан науково-технічних розробок в сфері підвищення ефективності вібраційної техніки. Виробнича діяльність в більшості галузей промислового виробництва забезпечується роботою різного роду технологічних машин та транспортних засобів. Експлуатація машин, обладнання, механізмів, апаратури та приладів в умовах необхідності забезпечення високої продуктивності часто супроводжується значними динамічними навантаженнями, вібраційними процесами та проявами ударних взаємодій елементів машин. Забезпечення надійності та безпеки експлуатації машин вимагає на всіх стадіях їх життєвого циклу серйозної уваги до питань дотримання певних обмежень на параметри динамічних станів технічних об'єктів, розробки способів та засобів оцінки контролю та управління процесами динамічних взаємодій. Сучасне машинознавство є науковим базисом для вирішення основних завдань динаміки машин, що, в цілому, спирається на науковий потенціал, створений вітчизняними та зарубіжними вченими в області теоретичної та прикладної механіки, теорії механізмів, динаміки та міцності машин, розвиток наукових напрямків в теорії автоматичного управління, прикладного системного синтезу і ін. Отримані результати наукових досліджень, знайшли відображення в працях відомих вчених.

Сформована практика передпроектних досліджень створюваних машин, обладнання та апаратури заснована на широкому використанні засобів математичного моделювання, застосування засобів обчислювальної техніки. Вибір обладнання на виробництвах проводиться виходячи з собівартості, продуктивності, габаритних розмірів, енергоспоживання та ін.

У зв'язку з цим виникає питання необхідності пошуку та розробки нових підходів, способів та засобів забезпечення ефективності та надійності роботи технологічних машин та устаткування.

Ключові слова: вібраційна техніка, коливальні системи, вібраційний вплив, вібраційне поле, динамічне навантаження/

Ф. 1. Рис. 28. Літ. 24.

1. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Попри всю різноманітність технічних способів та засобів підвищення продуктивності праці вібраційна техніка та технології продовжують розширювати свої позиції в машинобудуванні, будівництві, агропромислових галузях. Особливо помітне місце займає вібраційна техніка в виробничих процесах, пов'язаних з видобутком та переробкою корисних копалин. Високий рівень розвитку вібраційної техніки та технологій багато в чому зумовлюється науковими розробками фахівців [1, 2, 3, 4, 9, 15] та розвитком досліджень в різних напрямках сучасної механіки і її додатків [5, 6, 8, 11]. З одного боку, зростаючі вимоги до ефективності вібраційної техніки вимагають поглибленого вивчення фізико-механічних закономірностей впливу вібрацій на реалізацію технологічних процесів, що пов'язано з поглибленням та розвитком теорії вібраційних технологій. З іншого боку, підвищення продуктивності та потужності вібраційних машин, зростання динамічних навантажень вимагають розгляду виробничих процесів з єдиних позицій, які відображають потреби в забезпеченні надійності машин та безпеки їх експлуатації, а також досягнення високої динамічної якості, необхідної для створення конкурентоспроможного обладнання в умовах конкурентних економічних відносин. [10, 12, 14, 17].

Актуальність наукових розробок в області динаміки технічних об'єктів, що працюють в умовах інтенсивних вібраційних впливів зумовлюється зростанням уваги до проблем забезпечення динамічної

якості машин, розширенню їх можливостей безпечної та надійної експлуатації при підвищенні швидкості руху робочих органів. Необхідність пошуку та розробки нових підходів, способів та засобів забезпечення надійності роботи технологічних засобів ініціює дослідження теоретичної та практичної спрямованості в задачах динаміки механічних коливальних систем.

2. Мета дослідження

Об'єктом дослідження є технологічні вібраційні машини, обладнання та апаратура, що працюють в умовах інтенсивних динамічних навантажень.

3. Виклад основного матеріалу

В рамках узагальненого підходу можна виділити ряд основних операцій, що здійснюються із застосуванням вібрацій: переміщення, розділення, обробка дисперсних середовищ, обробка деталей з метою зміцнення та модифікації властивостей поверхонь, забезпечення взаємодії деталей в складальних процесах машинобудування та ін. [5, 8, 11, 12]. Для багатьох вібраційних технологічних процесів для забезпечення необхідних показників якості та продуктивності стає необхідною регламентація параметрів вібраційних полів, режимів вібраційних процесів, частотного спектра колювання робочих органів та обліку специфіки динамічних взаємодій елементів вібраційних систем.

Вібраційні машини за їх виробничим призначенням можна розділити на транспортні, транспортно-технологічні, вантажні та машини для дроблення, подрібнення, розділення насипних та багатофазних середовищ (грохоти, сепаратори, центрифуги та ін.); для змішування багатофазних середовищ; різання металів та руйнування порід; пристрої для підвищення ефективності обробки металів тиском та поліпшення структури лиття та ін. [5, 10, 13, 19].

Вібраційні транспортні машини включають конвеєри, живильники та грохоти, підйомники та бункери-дозатори. Конвеєри та живильники в універсальному виконанні для переміщення насипних та штучних матеріалів є найбільш поширеними. Особливо широко застосовуються вібраційні машини в гірничорудній промисловості.

На рис. 1 [11] наведені принципові схеми вібраційних млинів та їх модифікації виконання.

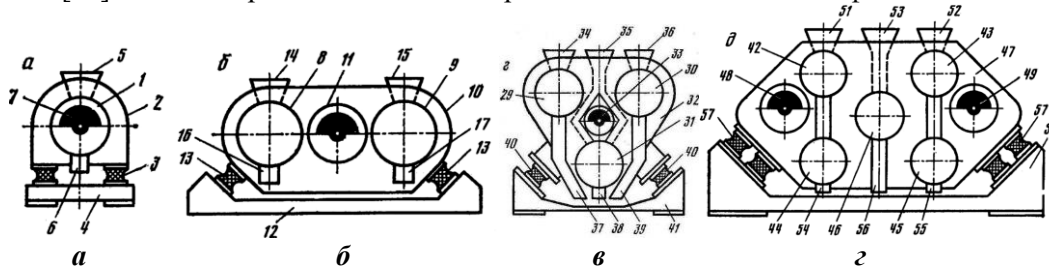


Рис.1. Принципові схеми вібраційних млинів: а – однокамерна; б – двокамерна з камерами, розташованими в одному рівні; в – трикамерна; г – п'ятикамерна.

На рис. 2 [11] наведена схема інерційного вібраційного млина

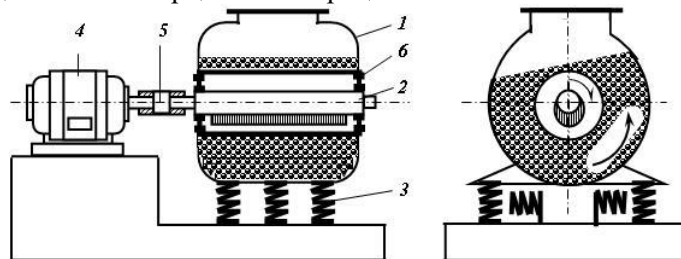
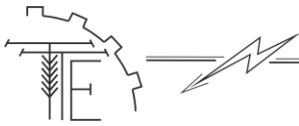


Рис.2. Схема інерційного вібраційного млина:

1 – барабан; 2 – дебалансний вал; 3 – пружини; 4 – електродвигун; 5 – гнучка муфта; 6 – підшипники.

Барабан завантажується кулями на 80 – 90 % об'єму. Розпушення, колювання й інтенсивне взаємне переміщення подрібнювальних тіл зумовлює подрібнення матеріалу у млині. Подрібнення здійснюється ударом та стиранням.

На рис. 3 [11] наведена схема безперервно діючого вібраційного млина. Матеріал, що



подрібнюється, постійно переміщується в камері подрібнення. Інтенсивний вібраційний вплив на шар матеріалу сприяє постійній та інтенсивній переорієнтації частинок одна відносно одної в робочій зоні, що підвищує імовірність руйнування усіх слабких зон в об'ємі кожної частинки. За кожний цикл переміщення частинка матеріалу змінює орієнтацію по відношенню до сусідніх частинок, тим самим створюються умови для примусового самоподрібнення: частинка з малими дефектами структури (більш міцна) руйнує сусідню з більшими дефектами структури. При цьому також прискорюється видалення залишків, які накопичуються між частинками, що, в свою чергу, обумовлює зменшення витрат енергії та зниження переподрібнення матеріалу.

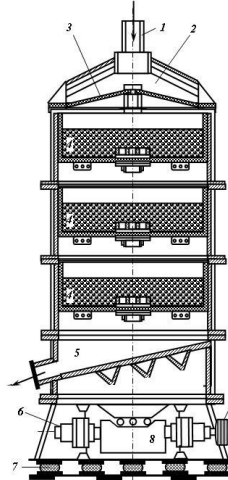


Рис. 3. Схема безперервно діючого вібраційного млина:

**1 – центральна труба; 2 – завантажувальна камера; 3 – розподільний пристрій;
4 – радіальні камери; 5 – розвантажувальна камера; 6 – секція приводу; 7 – гумові амортизатори; 8 – вал-дебаланс.**

На рис. 4 [11] наведено високоенергетичний вібраційний млин 80 мл VQ-N. Високоенергетичні кульові млини, вони досить компактні та дозволяють виробляти невелику кількість зразка легко та швидко. Вони мають високу енергію удару та використовують три виміри руху (обертання, вібрації та коливання). Інерція мелючих куль призводить до їх впливу з високою енергією на зразок матеріалу та розпилює його. Крім того, рух розмельного стакану в поєднанні з рухом куль призводить до інтенсивного перемішування зразка.

На рис. 5 [11] наведено вібраційний млин ВМ-400. Вібромлин [11] з просторово-циркуляційним рухом завантаження, при зміні маси робочого органу (в процесі відокремлення та вивантаження подрібненого матеріалу з помольної камери) постійно адаптується до резонансного режиму роботи при наперед заданих технологічно оптимальних параметрах (продуктивності) та мінімальних енергозатратах на вібропривод.



**Рис.4. Високоенергетичний вібраційний млин
80 мл VQ-N**



Рис. 5. Вібраційний млин ВМ-400

На рис. 6. [11] наведені принципові схеми багатоваріантного виконання вібраційних дробарок.

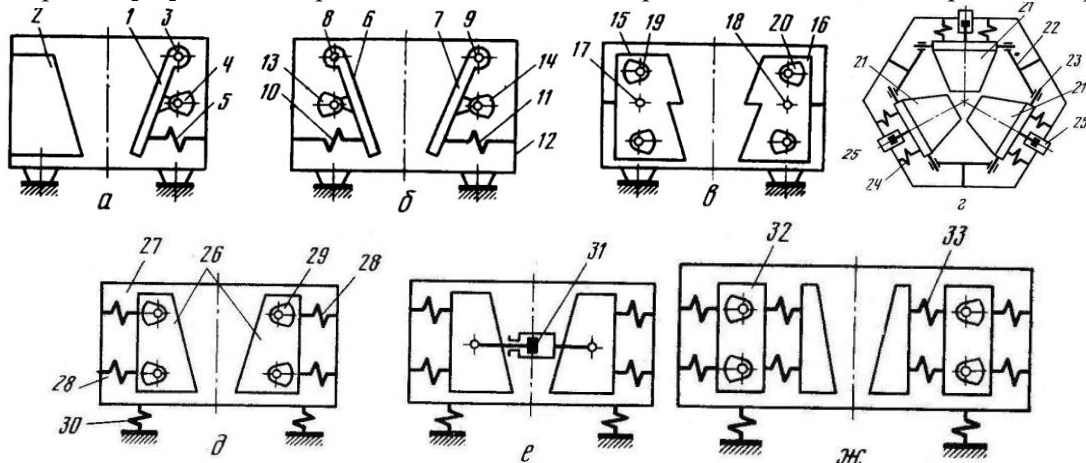


Рис.6. Принципові схеми вібраційних дробарок.

На рис. 7. [11] наведені схеми шоккових дробарок.

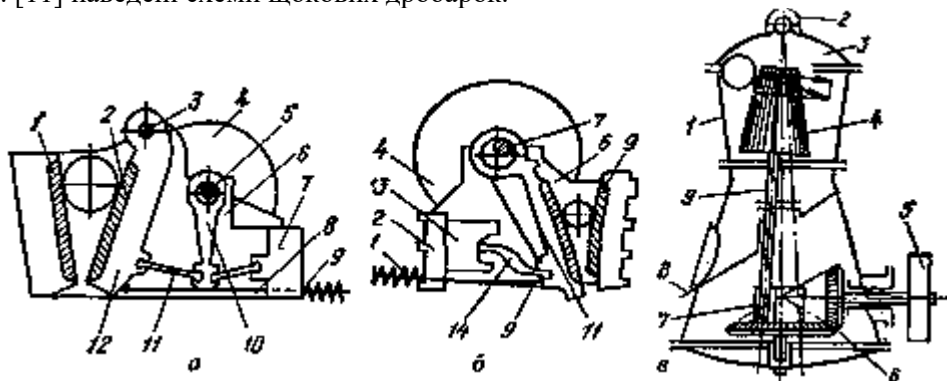


Рис. 7. Схема шоккових дробарок:

а – з простим рухом щоки; б – зі складним качанням щоки; 1 і 2 – нерухома та рухома дробильні плити; 3 – вісь; 4 – маховик-шків; 5 – ексцентриковий вал; 6 – станина; 7 – механізм регулювання розвантажувальної щілини; 8 – тяга; 9 – пружина; 10 – шатун; 11 – розпірні плити; 12 – рухома щока; 13 – вал; 14 – рухома щока-шатун; в – конусна дробарка: 1 і 4 – нерухомий та рухомий конуси; 2 – шарова п'ята; 3 – траверса; 5 – привідний шків; 6 – конічна передача; 7 – склянка; 8 – лоток; 9 – вал; 10 – живильник;

Кожен з конструктивних варіантів дробарок є механічною коливальною системою, яка має декілька ступенів свободи, містить кілька масоінерційних елементів, з'єднаних між собою та опорними поверхнями кількома пружинами. Рух складових елементів регламентується вимогами технологічного процесу, що засновано на вивченні та формуванні загальної картини взаємодії елементів. Якщо враховувати більш детально динамічні властивості руху окремих елементів, то можна відзначити необхідність реалізації зв'язності руху елементів дробарки по окремим координатам та дотримання певних співвідношень між амплітудами коливань окремих деталей.

Вібраційні транспортуючі машини мають істотні переваги перед багатьма іншими видами транспортуючих машин: простота конструктивного виконання; мінімальне число пар тертя; зручність обслуговування; можливість герметизації робочого органу та поєднання транспортування з різними технологічними процесами; можливість переміщення товарів, які важко транспортувати іншими способами; можливість безперевантажувального транспортування, найбільша оптимальна довжина на один привід; можливість проміжної завантаження та розвантаження конвеєра; малі габарити по висоті; невелику питому витрату енергії на переміщення вантажу; можливість створення врівноважених конструкцій, які не передають коливання на фундамент; тривалий термін служби [9,10].

Для транспортуючих вібраційних технологічних машин (рис. 8) необхідно створення умови для переміщення сипучого середовища.

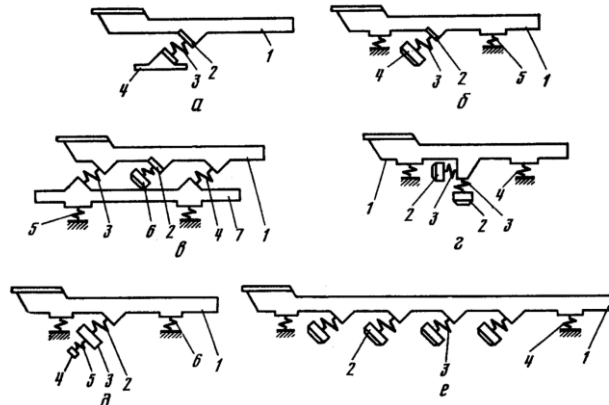


Рис. 8. Принципові схеми вібраційних транспортуючих та транспортно-технологічних машин з електромагнітним приводом [10]

Серед зарубіжних фірм, що займаються розробкою вібраційних машин з електромагнітним приводом можна відзначити такі, як: “Roto-Finish”, “Valter”, “Lord Chemical”, “Trowal”, “Wibral”, “Jeffrey Specialty Equipment Corporation”, “Alan Ross Machinery”, “B.E.S.T. Inc.”, “V.T.R. Inc.”, “JVT”, “Ward Industrial Equipment Ltd”, “Vibro Techniques”, “OEPL”, “Autofeed Corporation”, “Carrier Vibrating Equipment, Inc.”, “General Kinematics”, “Vimec”.

Для машин такого типу характерно наявність просторового твердого тіла, що опирається на пружини та з допомогою вібробудувача формує плоске вібраційне поле, що забезпечує необхідний рух сипучого середовища або штучних деталей з певною швидкістю. Налаштування таких машин, якщо мати на увазі структуру та параметри вібраційного поля, вимагає попередніх досліджень на математичних моделях, що необхідно для підтримки умов стійкої роботи за допомогою системи управління станом конвеєра.

Заслужує уваги патент американської корпорації General Kinematics Corporation та самого винахідника Richard B. Kraus №2 518 736 A1 (CA) від 2006 р. “Linear Drive for Vibratory Apparatus”, де пропонується раціональна конструкцію тримасової віброустановки (рис. 9).

Конструкція тримасового вібраційного транспортера не з електромагнітним приводом, однак вона цікава тим, що маса, яка безпосередньо збуджує коливання не має пружного зв'язку. Так, поршень 6, що може вільно рухатись вздовж своєї осі приводиться в рух за рахунок пульсацій повітря. Інерційні сили, що виникають, передаються через пружну систему 5 на активну масу 1, де уже МКС входить в резонанс, як тримасова конструкція.

У межах Львівської політехніки над створенням тримасових вібраційних машин були задіяні такі науковці та провідні інженери, як В.О. Повідайло, Р.І. Сілін, В.А. Щигель, В.Д. Уфимцев, О.В. Гаврильченко, Ю.П. Шоловій, А.Л. Беспалов. Ними були розроблено та апробовано широкий спектр мало- та середньогабаритних вібраційних машин різноманітного призначення з використанням динамічного гасника. Конструктивні схеми таких машин були тримасовими, однак в розрахункових схемах вони зводились переважно до двох та одномасових. На таких динамічних схемах, для прикладу, були створені вібраційні бункери, швидкість транспортування деталей в яких становила 1,7 м/с (рис. 10).

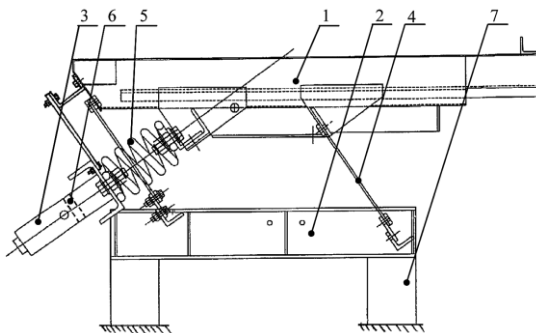


Рис. 9. Тримасовий вібраційний транспортер

Рекомендації з розрахунку вібраційних наводяться в роботах [10, 11, 12, 15].



Рис. 10. Тримасове вібраційне обладнання: торова вібраційна машина об'ємної обробки

конвеєрів, живильників різного призначення

Розвиток та вдосконалення конструкторсько-технічних рішень в напрямку підвищення ефективності роботи та продуктивності конвеєрів, живильників, сепараторів знайшло відображення в застосуванні пружних (еластичних) футеровок робочих органів вібраційних машин та насиченню їх конструкцій пружними елементами, як показано на рис. 11 та рис.12 [10, 16, 17, 19].

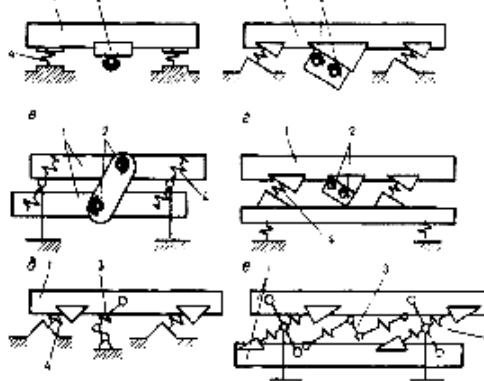


Рис. 11. Принципові схеми вібраційного живильника:

а – інерційного одномасного з дебалансним вібратором; б – інерційного одномасного з самобалансним вібратором; в – інерційного одномасного урівноваженої системи; г – інерційного двомасного; д – ексцентрикового неурівноваженого; е – ексцентрикового урівноваженого; 1 – вантажонесучий орган; 2 – вібратор; 3 – ексцентрик; 4 – пружні зв'язки.

Розрахункова схема одновимірної моделі вібраційної машини представлена на рис. 12. Для оцінки стану вібраційного поля використовуються поняття про наведені маси та жорсткості, а робоче середовище представляється у вигляді зв'язаних між собою коливальних структур простого виду (рис. 13) [10].

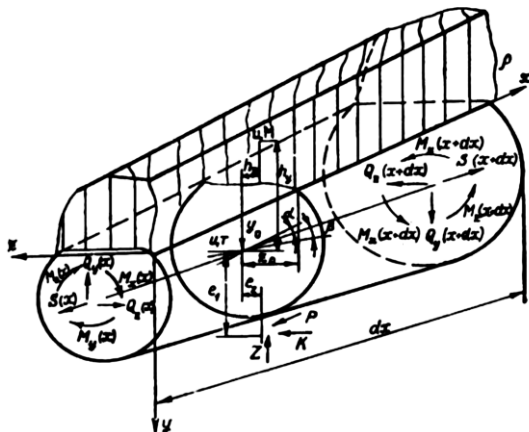


Рис. 12. Розрахункова схема одновимірної моделі робочого органу вібраційних транспортно-технічних машин [10]

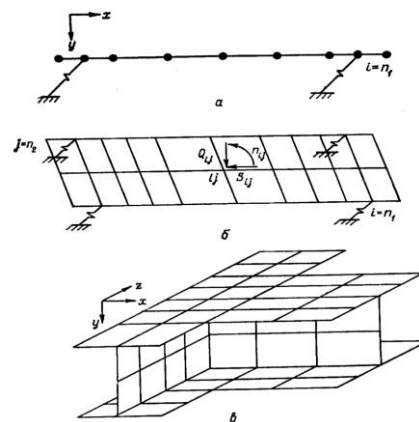


Рис. 13. Розрахункові схеми: а – одновимірна, б – плоско-просторова, в – просторова

Для деталізованих моделей, що відображають рух робочого середовища використовується метод скінченних елементів [20].

На сьогоднішній день зерночисні машини та апарати, що використовують у своїй роботі принцип вібрації, займають домінуюче становище на підприємствах харчової промисловості та сільського господарства, так як є відносно простими та в ряді випадків дозволяють інтенсифікувати процес вилучення домішок шляхом об'єднання в єдиний комплекс окремих пристроїв, застосовуваних для процесу сепарування (рис. 14) [10, 15, 17].

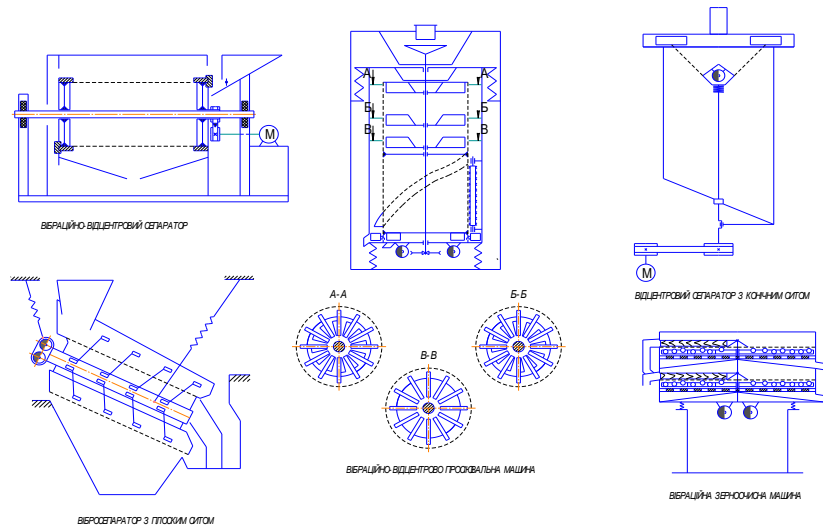


Рис. 14. Принципові схеми вібраційних сепараторів:

а – сепаратор вібраційно-відцентровий; б – вібраційно-відцентрова просіювальна машина; в – вібраційно-відцентровий з конічним ситом; г – вібросепаратор з плоским ситом; д – вібраційна зерноочисна машина

Комбінований вібропривід (рис. 16) розроблений у Вінницького національному аграрному університеті раціонально вписується в конструкцію вібраційного грохота з конічним ситом (рис. 15) [16] та може використовуватись для генерування як плоских, так і просторових коливань. Вертикальне розміщення привідного валу віброзбуджувача грохота дозволяє створити гіраційний рух робочих органів машини в горизонтальній площині.

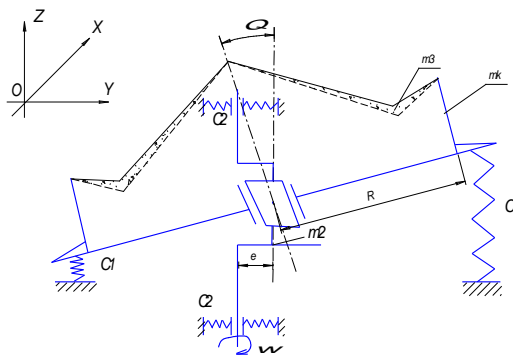


Рис. 15. Вібраційний грохот, робочі органи якого здійснюють гіраційні просторові рухи

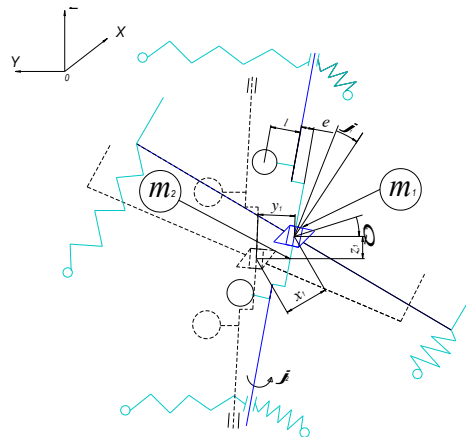


Рис. 16. Комбінований кінематичний вібропривід. Математична модель

Дана вібросистема характеризується наявністю шести степеней вільності, а саме:

- X – відхилення центра маси m вздовж осі Ox ;
- Y – відхилення центра маси m вздовж осі Oy ;
- Z – відхилення центра маси m_1 вздовж осі Oz ;
- φ_1 – кут повороту контейнера навколо осі Oz ;
- θ_1 – кут повороту контейнера відносно горизонтальної площини;
- φ_2 – кут повороту маси m_2 навколо осі Oz .

В результаті дослідження динаміки даної вібромашини по кожній із степеней вільності складені диференціальні рівняння руху (1), які мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x}_1 + \alpha_x \dot{x}_1 + k_x^2 x_1 = \frac{m_3 l}{m_0} \dot{\varphi}_2^2 \cos \varphi_2 \\ \ddot{y}_1 + \alpha_y \dot{y}_1 + k_y^2 y_1 = \frac{m_3 l}{m_0} \dot{\varphi}_2^2 \sin \varphi_2 \\ \ddot{z}_1 + \alpha_z \dot{z}_1 + k_z^2 z_1 = \frac{m_3 l}{m_0} \dot{\varphi}_2^2 \sin \Theta \\ \ddot{\varphi}_1 + k_\varphi \varphi_1 = I_1^{-1} (M_{кр} - M_{он}) \\ \ddot{\Theta}_1 = (I_1')^{-1} [m_3 l^2 \dot{\varphi}_2^2 \sin \Theta - C_z R_z] \\ \ddot{\varphi}_2 = (I_2 + m_3 l^2)^{-1} (M_{кр} - M_{он}) \end{array} \right. \quad (1)$$

де k_x^2 , k_y^2 , k_z^2 – власні частоти коливань відносно відповідних осей координат; α_x , α_y , α_z – коефіцієнти дисипації за відповідними напрямками осей координат; I_1 , I_2 – моменти інерції відповідних мас; $M_{он}$ – момент опору в підшипникових вузлах; C_x , C_y , C_z – жорсткість пружних елементів відповідно у напрямках Ox , Oy , Oz ; $m_0 = m_1 + m_2 + m_3$ – загальна рухома маса системи, $m_1 = m_k + \xi_m m_{зав}$; $m_2 = m_v + m_{п}$; $m_3 = m_{деб}$ – маса противаг дебалансного типу.

Аналіз складених рівнянь дозволяє визначити амплітудно-частотні та енергетичні характеристики (рис. 17).

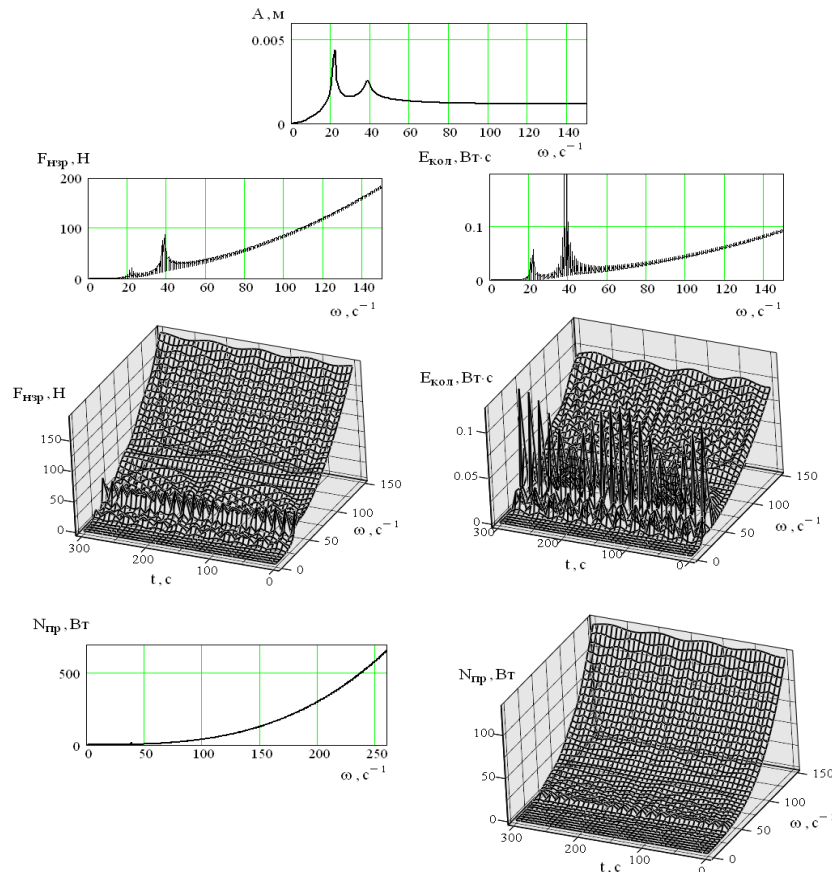


Рис.17. Амплітудно-частотні ($f = A(\omega)$), силові ($f = F_{нпр}(\omega, t)$) та енергетичні ($f = N_{пр}(\omega, t)$), $E_{кол}(\omega, t)$ характеристики комбінованого кінематичного віброприводу просторових коливань: A – амплітуда коливань робочого контейнера; $N_{пр}$ – потужність приводу; $F_{нпр}$ – незрівноважені зусилля, що навантажують опорні вузли; $E_{кол}$ – енергія коливальних мас.

Даний вібраційний сепаратор, що має енергозберігаючий привід, можна раціонально використовувати для потреб малих фермерських господарств. Конструкція грохота дозволяє швидко налаштовувати робочі режими, в залежності від виду сипкої сільськогосподарської продукції. Розрахований на невеликі об'єми продукції та енергозбереження..

Особливістю підходів в оцінці форм та різноманітності динамічної взаємодії елементів

вібраційної машини та робочого середовища, в силу специфіки технологічних процесів, є вибір феноменологічних моделей, які орієнтовані на експериментальну перевірку. У меншій степені використовуються дані, що відображають можливості більш деталізованих математичних моделей [5].

Ряд важливих питань для формування уявлень про динаміку вібраційних технологічних машин викладено в роботах [9, 10, 18]. Це пов'язано, в першу чергу з тією увагою, яка стала приділятися моделям гнучких коливальних процесів, що виникають при взаємній динаміці елементів вібраційних машин. На рис. 18 показано особливості структури вібраційного поля робочого органу або розподілу амплітуд коливань по його довжині.

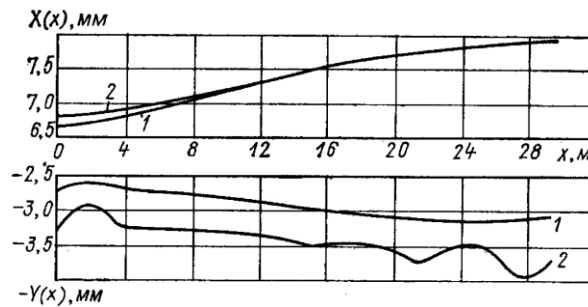


Рис. 18. Розподіл амплітуд вимушених поздовжніх $X(x)$ та поперечних $Y(x)$ коливань по довжині робочого органу: 1) - $lc = 1$ м; 2) - $lc = 3,22$ м [10]

Більш складна картина взаємодії наведена на рис. 19, що супроводжується поданням математичних моделей у вигляді систем рівнянь в окремих похідних. Запропоновані підходи ініціювали увагу до питань формування структури вібраційних полів, як одного з основних завдань динаміки вібраційних технологічних машин.

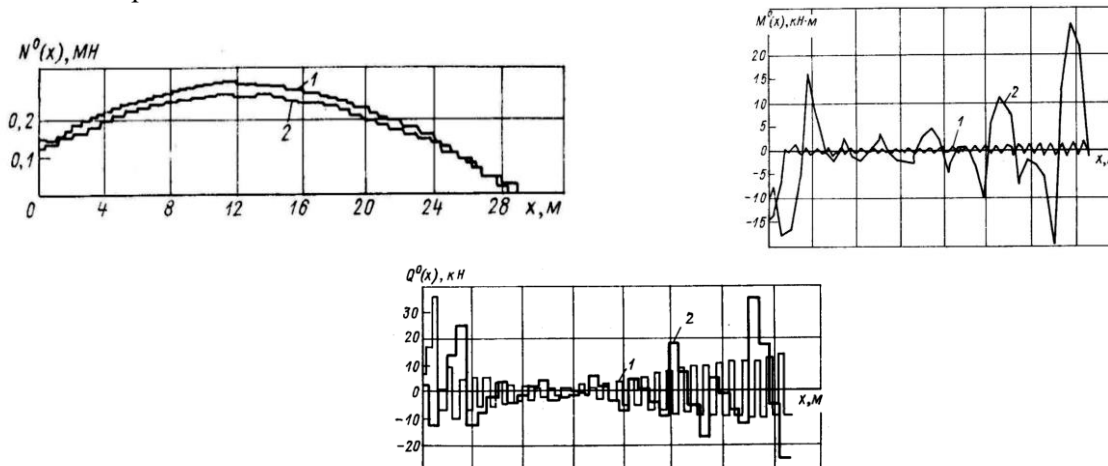


Рис. 19. Розподіл амплітуд внутрішніх поздовжніх сил $N^0(x)$, згинальних моментів $M^0(x)$ та сил перерізу $Q^0(x)$ по довжині робочого органу: 1) – $lc = 1$ м; 2) – $lc = 3,22$ м [10]

Увага до питань формування вібраційних полів визначеної структури, тобто розгляд просторових структур розподілу амплітуд коливань в певних точках механічних коливальних систем, наводиться в роботах [13].

Робота вібраційних машин в багатьох практичних завданнях побудована на формуванні силових взаємодій робочих органів з навколишнім середовищем, що пов'язано з уявленнями про створення вібраційних полів. Зокрема, це відноситься до робочих органів вібростендів, віброживильників, вібраційних конвеєрів, класифікаторів та сепараторів. Теоретичні основи таких підходів було використано в роботах [2, 7, 11, 9, 15, 17].

Динамічний вплив з боку робочих органів вібраційних машин визначає структуру вібраційного поля, розподіл амплітуд коливань окремих точок та утворення певних траєкторій руху зумовлює можливості реалізації вібраційних технологічних процесів [8, 12, 13, 22]. На рис. 20 приведена діаграма плоского вібраційного поля, що створюється для технологічних задач класифікації сипучого середовища за параметрами, її сепарації [7]. Для створення такого розподілу рухів в площині робочий орган повинен здійснювати гармонічні коливання в площині по двох взаємно перпендикулярних напрямкам при дотриманні певних співвідношень між частотами коливань робочого органу.

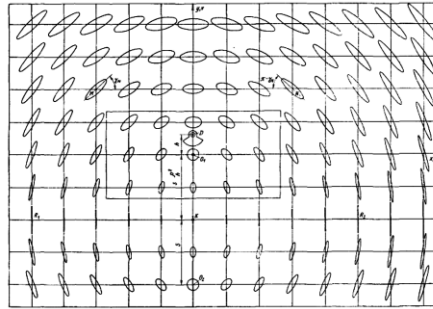


Рис. 20. Універсальна діаграма плоского поля коливань

Для вібраційних технологічних машин характерне використання одновимірних вібраційних полів. Приклади такого роду полів наводяться на рис. 21 [7].

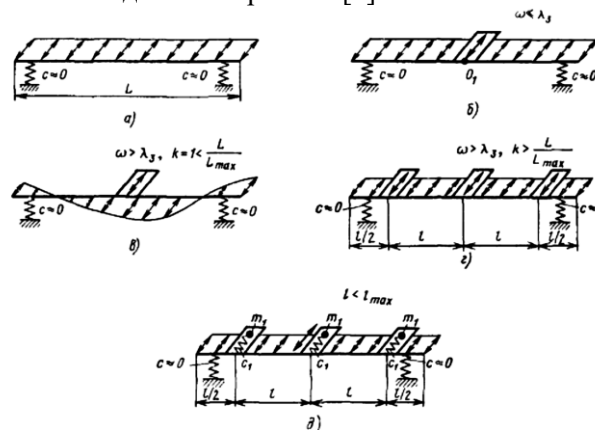


Рис. 21. Способи збудження однорідного поля прямолінійних гармонійних коливань вільної балки: а – схема балки та ідеальний розподіл коливань; б – один віброзбуджувач в разі "жорсткої" балки; в – один віброзбуджувач в разі "нежорсткої" балки; г – n вібровозбуджувачів в разі "жорсткої" балки; д – резонансний принцип збудження

Для створення одновимірного вібраційного поля коливань можна обмежитися одним збуджувачем. Такий спосіб вирішення завдань синтезу закону коливань може бути застосований і в разі систем з більш складним рухом.

Для поширених, в будівельній індустрії та гірничо-рудній промисловості, вібростендів часто застосовують робочі органи у вигляді протяжного твердого тіла на пружних опорах, що здійснює плоскі коливання, показано на рис. 22 [7].

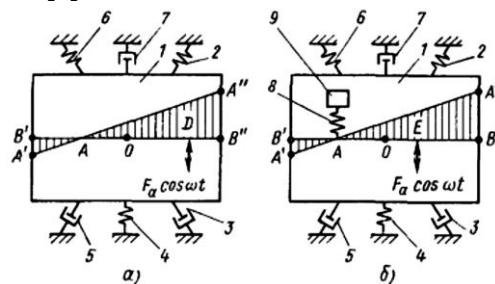


Рис. 22. Схеми забезпечення заданої епюри амплітуд переміщення виконавчого органу: а – шляхом позацинтового розташування віброзбуджувача; б – шляхом установки динамічного віброгасника.

Характерним в згаданому підході є увага до питань впливу на можливості зміни структури вібраційного поля через установку динамічного гасника коливань. У більш деталізованому вигляді, можливості використання ефектів впливу режимів динамічного гасіння коливань розглянуті в роботі [14].

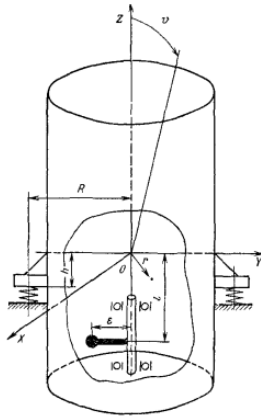


Рис. 23. Динамічна схема одномасної відцентрової вібраційної машини з просторовими коливаннями робочого органу

свободи, що створює труднощі при аналітичних підходах, але дозволяє використати методи чисельного моделювання на основі пакетів прикладних програм [21].

Складні форми динамічної взаємодії реалізуються в технологічних процесах вібраційного зміцнення деталей, призначених для роботи в умовах інтенсивного динамічного навантаження. На рис. 24, рис. 25 та рис. 26 наведені принципові схеми вібраційної обробки [12, 22].

При реалізації ряду технологічних вібраційних процесів зі складними формами реалізації взаємодії робочого середовища з оброблюваним тілом, використовуються схеми формування просторових вібраційних полів, створюваних при проходженні через резонансні зони, в яких формуються особливі динамічні взаємодії робочого середовища та деталей. До вібраційних машин цього типу можна віднести, наприклад, інерційні дробарки, віброізовані конусні дробарки звичайного типу, сепаратори та інші пристрої, розрахункова схеми яких приведена на рис. 23 [7].

Вібраційне поле такої системи вимагає побудови математичної моделі на основі просторової структури з шістьма ступенями

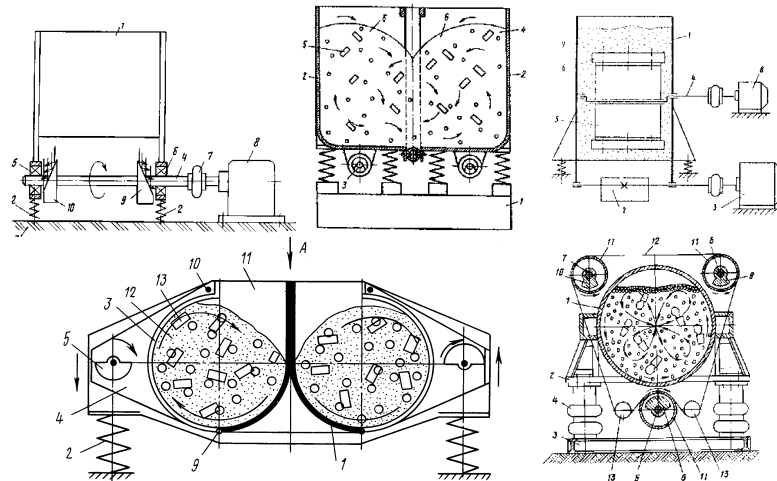


Рис. 24. Схеми машин для вібраабразивної обробки деталей

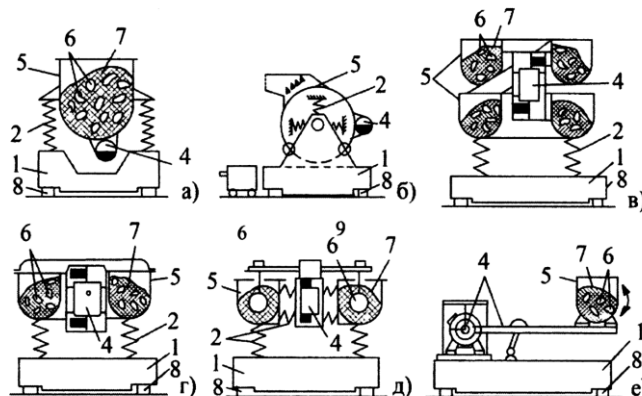


Рис. 25. Схеми віброобробки деталей без закріплення: 1 - основа; 2 - пружні елементи; 3 - рухома рама; 4 - вібратор; 5 - контейнер; 6 - оброблювані деталі; 7 - інструментальне середовище; 8 - амортизатори; 9 - активатор коливань

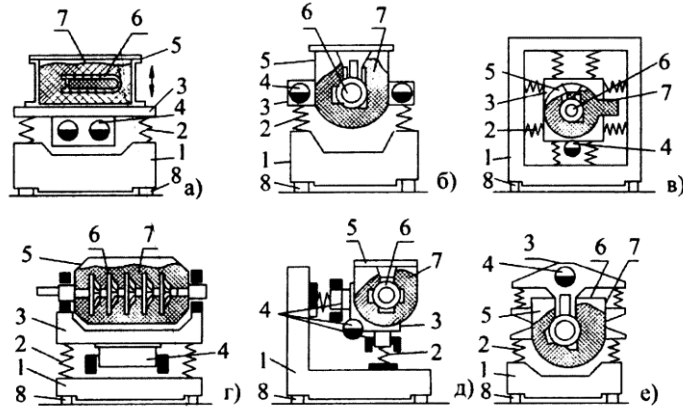


Рис. 26. Схеми віброобробки деталей без закріплення: 1 - основа; 2 - пружні елементи; 3 - рухома рама; 4 - вібратор; 5 - контейнер; 6 - оброблювані деталі; 7 - інструментальне середовище; 8 - амортизатори

Ряд питань, пов'язаних з деталізацією уявлень про зміни параметрів та корекції структури вібраційних полів технологічних машин розглянуто в роботах [14]. Проблеми забезпечення узгоджених рухів механічних коливальних систем, зв'язності рухів по окремим координатам характерні, в цілому, для вібромашин, конструктивно-технічних форм (рис. 27) [17, 18, 22].

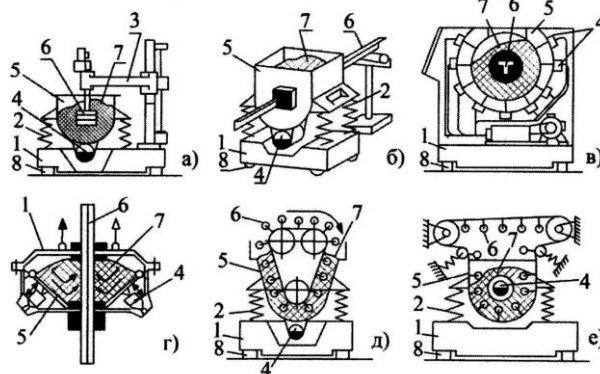


Рис. 27. Схеми вібромашин прохідного та конвеєрного типу: 1 - основа; 2 - пружні елементи; 3 - рухома рама; 4 - вібратор; 5 - контейнер; 6 - оброблювана деталь; 7 - інструментальне середовище; 8 - амортизатори

Питання забезпечення умов реалізації вібраційних технологічних процесів тісно пов'язані з вирішенням завдань динаміки, які відносяться до теорії та практики вібраційних систем [14, 15, 17, 19].

На рис. 28 [8, 22] представлена принципова схема вібраційної машини динамічний стан, якої підтримується на контролі відповідно до визначеної форми амплітудно-частотних та фазово-частотних характеристик, що вимагає врахування зв'язності руху елементів системи та особливостей динамічних ефектів в зонах, близьких до режиму динамічного гасіння коливань та резонансам. Дослідження показують, що амплітуди коливань різних точок ділянок поверхонь деталі та контейнера відрізняються між собою до 40-50% та більше. Нерівномірність розподілу амплітуд коливань точок виникають у зв'язку з неспівпадінням координат прикладеної збуджуючої сили вібратора з центром мас рухомої системи (рис. 28) та з центром жорсткості пружних елементів, а також - різною основою власних частот за координатами від частоти вимушених коливань.

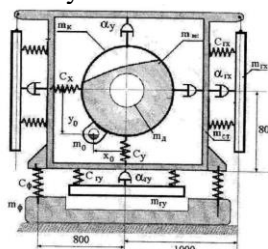


Рис. 28. Схема центрованої технологічної системи для віброударного зміцнення деталей в близько-резонансному режимі зі зміщенням вібратором



4. Висновки

Таким чином, при всьому різноманітті конструктивно-технічних форм технологічних вібраційних машин, їх розрахункові схеми представляють собою механічні коливальні системи з декількома ступенями свободи. Завдання реалізації технологічних процесів пов'язані з необхідністю вибору розподілу амплітуд коливань точок робочих органів в певній структурі вібраційного поля. Це досягається шляхом вибору параметрів елементів коливальних систем, організацією певних форм взаємодії елементів, таких динамічних режимів як зв'язність рухів, динамічне гасіння коливань, резонансні або близько резонансні рухи. Велике значення має врахування таких факторів як сумісність дії збуджуючих чинників та вид зовнішніх збурень, які можуть бути різної форми.

Аналізуючи представлений огляд виникає необхідність в удосконаленні існуючих, розробці та впровадженні нових конструкцій вібраційних машин з раціональними режимами та параметрами роботи. Розробка нової вібраційної техніки, працюючої з меншим енергоспоживанням, сприятиме підвищенню продуктивності та зниження собівартості продукції, а також збільшенню обсягу їх виробництва. Тому дослідницькі роботи в даному напрямку є актуальними.

Список використаних джерел

1. Абидуев А. А. Повышение эффективности технологических процессов фракционной очистки зерна и семян : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.20.01 / Улан-Удэ, 2018. 383 с.
2. Крупеня Е. Ю., Шишкина А. П., Макарова Н. С. Вибропротирка деталей средами органического происхождения с применением низкочастотных колебаний. *Современные аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности* : сб.тр. Всерос. науч.-практ. конф. Технические науки (г. Таганрог, 20 мая 2016). Ростов н/Д : ДГТУ, 2016. С. 182–186.
3. Васильев А. М., Мачихин С. А., Стрелюхина А. Н., Рындин А. А. Повышение эффективности процессов сепарирования зерновых смесей на рифленой поверхности. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2018. №3. С. 98–105.
4. Бабичев А. П., Мотренко П. Д., Гиллеспи Л. К. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей. ДГТУ : Ростов-на-Дону, 2010. 285с.
5. Гиевский А. М. Повышение эффективности работы универсальных воздушно-решетчатых зерноочистительных машин : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.20.01 / Воронеж, 2016. 346 с.
6. Nessler P. Modelling and control of vibration in mechanical systems. Uppsala Univ. Sweden 102 p. URL: <http://www.it.uu.se> 2005.
7. Вибрации в технике : справочник в 6 томах. Вибрационные процессы и машины / ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). М.: Машиностроение, 1981. Т. 4. 509 с.
8. Пановко Г. Я. Лекции по основам теории вибрационных машин и технологий : учеб. пособие. Москва : изд-во МГТУ Н.Э. Баумана, 2008. 192 с.
9. Повідайло В. О. Вібраційні процеси та обладнання. Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка", 2004. 248 с.
10. Потураев, В. Н. Франчук В. П., Надутый В. П. Вибрационная техника и технологии в энергоемких производствах. Днепропетровск: НГА Украины, 2002. 190 с.
11. Солоня О. В. Керований вібраційний млин для помолу сипкого середовища. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 4(99). С. 11–20.
12. Бабичев А. П., Бабичев И. А. Основы вибрационной технологии. Ростов-на-Дону: изд-во центр ДГТУ, 2008. 693 с.
13. Вайсберг Л. А., Зарогатский Л. П., Туркин В. Я. Вибрационные дробилки. Санкт-Петербург: изд-во Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, 2004. 306 с.
14. Елисеев А. В., Мамаев Л. А., Ситов И. С. Некоторые подходы к обоснованию схемы инерционного возбуждения в технологических вибрационных машинах. *Системы. Методы. Технологии*. 2015. № 4 (28). С. 15–24.
15. Франчук В. П. Инженерные методы расчета и выбора динамических параметров вибрационных грохотов, конвейеров, питателей. *Збагачення корисних копалин. Науково-технічний збірник*. 2001. № 12 (53). С. 126–143
16. Омелянов О. М., Замрій М. А. Напрямки підвищення ефективності роботи вібраційних технологічних машин. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 4(99). С. 49–58
17. Купчук І. М. Перспективи розвитку конструктивних схем вібраційних приводів транспортних і технологічних машин АПК. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2018. №3 (90). С. 44–52
18. Фалько О. Л., Коваленко А.В. Енергозберігаюча схема роботи вібраційного транспортера з декою нової конструкції. *Проблеми харчових технологій і харчування*. Сучасні виклики і



перспективи розвитку : тез доп. VII Міжнар. наук.-практ. конф., 7–9 верес. 2011 р., Донецьк–Святогірськ. Донецьк, 2011. С. 196–197.

19. Karnovsky I. A., Lebed E. Theory of Vibration Protection. Springer International Publishing, Switzerland, 2016. 708 p.
20. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Калетнік Г. Н., Куценко А. Г. Использование прямого метода граничных элементов при исследовании стационарных колебаний пластин. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. №1(84). С.8–14.
21. Чубик Р. В., Ярошенко Л. В. Метод стабілізації технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля адаптивних вібраційних технологічних машин. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2008. № 2(51). С. 57–60.
22. Копылов Ю. Р. Динамика процессов виброударного упрочнения. Воронеж: Научная книга, 2011. 568 с.
23. Лебедев В. А. Шишкина А. П., Крупеня Е. Ю. Повышение качества виброотделки поверхностей высокоточных деталей средами органического происхождения. *Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева*. 2017. №2(41), С. 132–137.
24. Саленко Ю. С. Определение рациональных параметров вибрационного транспортера. *Збірник наукових праць Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»*. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. Полтава, 2015. Вип. 2 (44). С. 3–9.

References

- [1] Abiduev, A. A. (2018). *Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskikh processov frakcionnoj ochistki zerna i semyan: dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.20.01. Ulan - Ude*. [in Russian].
- [2] Krupenya, E.Yu., Shishkina, A.P., Makarova N.S. (2016). Vibroprotirka detalej sredami organicheskogo proiskhozhdeniya s primeneniem nizkochastotnykh kolebaniy. *Sovremennyye aspekty razvitiya nauki, obrazovaniya i modernizacii promyshlennosti: sb.tr. Vseros. nauch.-prakt. konf. Tekhnicheskie nauki (g. Taganrog, 20 maya 2016)*. Rostov n/D: DGTU, 182–186. [in Russian].
- [3] Vasil'ev, A.M., Machikhin, S.A., Strelyukhina, A.N., Ryndin, A.A. (2018). Povyshenie effektivnosti processov separirovaniya zernovykh smesey na riflenoj poverkhnosti. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya*. 3. 98–105. [in Russian].
- [4] Babichev, A.P., Motrenko, P.D., Gillespi, L.K. (2010). *Primenenie vibracziy`kh tekhnologiy na operacziyakh otdelochno – zachistnoy obrabotki detalej*. DGTU, Rostov n/D, 2010. [in Russian].
- [5] Gievskij, A.M. (2016). *Povyshenie effektivnosti raboty`universal`nykh vozdushno-reshetchatykh zernoochistitel`nykh mashin : dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.20.01 / Voronezh*. [in Russian].
- [6] Nessler P. (2005). *Modelling and control of vibration in mechanical systems*. Uppsala Univ. Sweden. 102 p. URL: <http://www.it.uu.se> 2005. [in English].
- [7] Chelomej, V.N. (1981). *Vibracziy v tekhnike : spravochnik v 6 tomakh. Vibracziy`e processy i mashiny*. M.: Mashinostroenie, 1981. T. 4. [in Russian].
- [8] Panovko, G.Ya. (2008). *Lekcii po osnovam teorii vibracziy`kh mashin i tekhnologij: uchebnoe posobie*. Moskva: izd-vo MGTU N.E. Bauman. [in Russian].
- [9] Povi`dajlo, V.O. (2004). *Vi`braczi`jni` proczesi ta obladnannya. L`vi`v: Vidavnicztvo NU "L`vi`vs`ka poli`tekhni`ka"*. [in Russian].
- [10] Poturaev, V.N., Franchuk, V.P., Naduty`j, V.P. (2002). *Vibracziy`naya tekhnika i tekhnologii v e`nergoemkikh proizvodstvakh*. Dneproetrovsk: NGA Ukrainy. [in Russian].
- [11] Solona, O.V. (2020). Kerovanij vi`braczi`jniy mlin dlya pomolu sipkogo seredovishha. *Vi`braczi`yi v tekhnici` ta tekhnologii`yakh*, 4(99), 11–20. [in Ukrainian].
- [12] Babichev, A.P., Babichev, I.A. (2008). *Osnovy` vibracziy`noy tekhnologii*. Rostov-na-Donu: izd-vo cenzr DGTU. [in Russian].
- [13] Vajsberg, L.A., Zarogatskij, L.P., Turkin, V.Ya. (2004). *Vibracziy`ne drobilki*. Sankt-Peterburg: izd-vo Vserossiyskij nauchno-issledovatel`skij geologicheskij institut im. A.P. Karpinskogo. [in Russian].
- [14] Eliseev, A.V., Mamaev, L.A., Sitov, I.S. (2015). Nekotory`e podkhody` k obosnovaniyu skhemy` inercziy`nogo vzbuzhdeniya v tekhnologicheskikh vibracziy`nykh mashinakh. *Sistemy`. Metody`. Tekhnologii*, 4 (28), 15–24. [in Russian].
- [15] Franchuk, V.P. (2001). *Inzhenerny`e metody` rascheta i vy`bora dinamicheskikh parametrov vibracziy`nykh grokhotov, konvejerov, pitatelej. Dnepropetrovsk: Zbagachennyya korisnikh kopalin. Naukovotekhnichnij zbirk, 12 (53), 126–143* [in Russian].
- [16] Omel`yanov, O.M., Zamri`j, M.A. (2020). Napryamki pi`dvishhennyya effektivnosti` roboti vi`braczi`jniy tekhnologii`chnik mashin. *Vi`braczi`yi v tekhnici` ta tekhnologii`yakh*, 4(99), 49–58. [in Ukrainian].
- [17] Kupchuk, I.M. (2018). Perspektivi rozvitku konstruktivnykh skhem vi`braczi`jniy privodi v transportnykh i tekhnologii`chnik mashin APK. *Vi`braczi`yi v tekhnici` ta tekhnologii`yakh*, 3(90), 44–52. [in Ukrainian].



- [18] Fal'ko, O.L., Kovalenko, A.V. (2011). Energozberi`gayucha skhema roboti vi`braczi`jnogo transportera z dekoju novoyi konstrukci`yi. *Problemi kharchovikh tekhnologi`j i`kharchuvannya. Suchasni`vikliki i`perspektivi rozvitku* : tez dop. VII Mi`zhnar. nauk.-prakt. konf., 7–9 veres. 2011 r., Donecz`k–Svyatogi`rs`k. Donecz`k, 196–197. [in Ukrainian].
- [19] Karnovsky, I.A., Lebed, E. (2016). *Theory of Vibration Protection*. Springer International Publishing, Switzerland. [in English]
- [20] Adamchuk, V.V., Bulgakov, V.M., Kaletni`k, G.N., Kuczenko A.G. (2017). Ispo`zovanie pryamogo metoda granichny`kh e`lementov pri issledovanii staczionarny`kh kolebanij plastin. *Vi`braczi`yi v tekhnici` ta tekhnologi`yakh*, 1 (84), 8–14. [in Russian].
- [21] Chubik, R.V., Yaroshenko, L.V. (2008). Metod stabi`li`zaczi`yi tekhnologi`chno optimal`nikh parametri`v vi`braczi`jnogo polya adaptivnikh vi`braczi`jnikh tekhnologi`chnikh mashin . *Vi`braczi`yi v tekhnici` ta tekhnologi`yakh*, 2(51), 57–60. [in Ukrainian]
- [22] Kopy`lov, Yu. R. (2011). *Dinamika proczessov vibroudarnogo uprochneniya*. Voronezh: Nauchnaya kniga. [in Russian].
- [23] Lebedev, V.A., Shishkina, A.P., Krupenya, E.Yu. (2017). Povy`shenie kachestva vibrootdelki poverkhnostej vy`sokotochny`kh detalej sredami organicheskogo proiskhozhdeniya. *Vestnik RGATU im. P.A. Solov`eva*. Ry`binsk: RGATU, 2(41), 132–137. [in Russian].
- [24] Salenko, Yu.S. (2015). Opredelenie raczional`ny`kh parametrov vibraczionnogo transportera. *Zbi`rnik naukovikh pracz` Naczi`onal`nogo uni`versitetu «Poltavs`ka poli`tekhni`ka i`meni` Yuri`ya Kondratyuka»*. Seri`ya: Galuzeve mashinobuduvannya, budi`vnicztvo. Poltava, 2 (44), 3–9. [in Russian].

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

В статье рассмотрено состояние научно-технических разработок в области повышения эффективности вибрационной техники. Производственная деятельность в большинстве отраслей промышленного производства обеспечивается работой различного рода технологических машин и транспортных средств. Эксплуатация машин, оборудования, механизмов, аппаратуры и приборов в условиях необходимости обеспечения высокой производительности часто сопровождается значительными динамическими нагрузками, вибрационными процессами и проявлениями ударных взаимодействий элементов машин. Обеспечение надежности и безопасности эксплуатации машин требует на всех стадиях их жизненного цикла серьезного внимания к вопросам соблюдения определенных ограничений на параметры динамических состояний технических объектов, разработки способов и средств оценки контроля и управления процессами динамических взаимодействий. Современное машиноведение является научным базисом для решения основных задач динамики машин, в целом, опирается на научный потенциал, созданный отечественными и зарубежными учеными в области теоретической и прикладной механики, теории механизмов, динамики и прочности машин, развитие научных направлений в теории автоматического управления, прикладного системного синтеза и др. Полученные результаты научных исследований, нашли отражение в трудах известных ученых.

Сложившаяся практика предпроектных исследований создаваемых машин, оборудования и аппаратуры основана на широком использовании средств математического моделирования, применения средств вычислительной техники. Выбор оборудования на производствах производится исходя из себестоимости, производительности, габаритных размеров, энергопотребления и др.

В связи с этим возникает вопрос о необходимости поиска и разработки новых подходов, способов и средств обеспечения эффективности и надежности работы технологических машин и оборудования.

Ключевые слова: вибрационная техника, колебательные системы, вибрационное воздействие, вибрационное поле, динамическая нагрузка

Ф. I. Рuc. 28. Лум. 24.

CURRENT STATE OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL DEVELOPMENTS IN THE FIELD OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF VIBRATION EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES

The article considers the state of scientific and technical developments in the field of improving the efficiency of vibration technology. Production activity in most branches of industrial production is provided by the work of various technological machines and vehicles. The operation of machines, equipment, mechanisms, apparatus and devices in the conditions of the need to ensure high productivity is often



accompanied by significant dynamic loads, vibration processes and manifestations of shock interactions of machine elements. Ensuring the reliability and safety of machines requires at all stages of their life cycle serious attention to compliance with certain restrictions on the parameters of the dynamic state of technical objects, the development of methods and means of assessing control and management of dynamic interactions. Modern mechanical engineering is a scientific basis for solving the main problems of machine dynamics, which, in general, is based on scientific potential created by domestic and foreign scientists in the field of theoretical and applied mechanics, theory of mechanisms, dynamics and strength of machines, development of scientific directions in automatic control theory, applied system synthesis, etc. The results of scientific research are reflected in the works of famous scientists.

The formed practice of pre-design researches of the created machines, the equipment and the equipment is based on wide use of means of mathematical modeling, application of means of computer engineering. The choice of equipment in production is based on cost, productivity, size, energy consumption, etc.

In this regard, there is a question of the need to find and develop new approaches, methods and means to ensure the efficiency and reliability of technological machines and equipment.

Keywords: vibration technology, oscillating systems, vibration influence, vibration field, dynamic loading

F. 1. Fig. 28. Lit. 24.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Твердохліб Ігор Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ, 21008, e-mail: igor_tverdokhlib@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-1350-3232>)

Омельянов Олег Миколайович – асистент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: omomelyanov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0441-6586>).

Твердохлеб Игорь Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета (г. Винница, ул. Солнечная 3, ВНАУ, 21008, e-mail: igor_tverdokhlib@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-1350-3232>)

Омельянов Олег Николаевич – асистент кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная 3, г. Винница, 21008, Украина e-mail: omomelyanov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0441-6586>).

Igor Tverdokhlib – candidate of technical sciences, associate professor of the department of general technical disciplines and occupational safety, Vinnytsia National Agrarian University Vinnytsia (st. Sonyachna 3, VNAU, 21008, e-mail: igor_tverdokhlib@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-1350-3232>)

Oleg Omelyanov – assistant of the department of general technical disciplines and occupational safety, Vinnytsia National Agrarian University (Vinnytsia, st. Sonyachna 3, VNAU, 21008, Ukraine, e-mail: omomelyanov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0441-6586>)