

## **Розробка системи керування вібромашини для змішування сипких матеріалів**

**В. П. Янович, Т. В. Гончарук, І. В. Гончарук, К. В. Ковальова**

*Розроблено мехатронну систему для комплексної оцінки та адаптації експлуатаційних параметрів вібраційної машини для приготування сипучих сумішей. Дана система містить блок активного аналізу динамічного стану коливної системи та блок керування приводним механізмом вібромашини. Функціональна взаємодія вищезначених блоків, залежно від типу сировини, забезпечує самостійну адаптацію вібромашини до технологічно оптимальних параметрів її роботи*

*Ключові слова: вплив вібрації на процес змішування, сипкий матеріал, система керування, оптимальні режимні параметри вібромашини*

### **1. Вступ**

Характерною рисою світового розвитку інформаційних технологій кінця ХХ і початку ХХІ століття є виділення інтегрально створених (комплексних) технологій, до яких належать і технології мікромеханічних систем. На теперішній час в світі зростає інтерес до розробки інтегральних датчиків, які дозволяють створювати різноманітні систем керування технологічних процесів. Ефективність даних процесів залежить від впорядкованості технологічних операцій та конструктивних особливостей машин для їх виконання.

Серед основних процесів первинної обробки сільськогосподарської сировини значного поширення набули процеси змішування сипких мас. Інтенсифікація даних процесів можлива при використанні вібраційних машин [1]. Дані машини характеризуються високою інтенсивністю обробки різноманітних дисперсних систем [2].

Перемішування відбувається практично в будь-якому процесі, де використовується вібрація, але якісне перемішування здійснюється тільки в спеціальних пристроях з цілеспрямованою вібрацією [3, 4].

Застосування вібраційних машин для перемішування сипких матеріалів дозволяє: збільшити продуктивність машини, зменшити її енергоємність та поліпшити якість отриманої суміші [5, 6]. Інтенсивний коливний рух виконавчих органів вібромашини сприяє створенню циркуляційного транспортування суміші у зоні обробки та забезпечує руйнування коагуляційних структур оброблюваного матеріалу.

### **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Ключовою операцією механічної обробки сипкої сировини є процес змішування різних високодисперсних матеріалів [7]. У більшості випадків даний процес реалізується внаслідок створення зсувних деформацій шарів матеріалу

при обертанні різноманітних лопатей та шнеків [8, 9]. Водночас, для забезпечення рівномірного розподілу компонентів в суміші, часткам дисперсної маси необхідно надати такі траєкторії руху, які забезпечували б найбільшу вірогідність перетину всього об'єму суміші [10, 11]. Проте складність даного явища зумовлена наявністю сил інерції та сил сухого внутрішнього тертя (тертя часток одна об одну). Також серед негативних факторів варто відзначити сили сухого зовнішнього тертя (тертя часток матеріалу об контейнер, лопаті чи інші робочі органи змішувача) які, як правило, на порядок нижчі від сил сухого внутрішнього тертя [12, 13]. Крім того, при змішуванні необхідно долати сили тяжіння, які намагаються опустити частки матеріалу донизу, що призводить до розшарування.

В якості характеристики вібраційного поля при змішуванні для визначення стану сипкого середовища використовують коефіцієнт перевантаження  $k$ , який в літературі [14] ще називають коефіцієнтом режиму вібрації, або коефіцієнт динамічності.

Експериментально встановлено, що при значенні коефіцієнта режиму вібрації  $k = 2,5 - 3$  створюються умови, коли сумарні енерговитрати на привод такого змішувача мінімальні, а це відповідає режиму безвідривного підкидання часток оброблюваного матеріалів.

При даних параметрах доцільно застосовувати комбіновану дію вібраційного поля та обертового руху робочого органа машини. За таких умов можливо досягти значення неоднорідності суміші в межах 3 % при тривалості процесу 80–120 с.

Сучасний розвиток вібраційного устаткування характеризується широким використанням прогресивних технологій на основі розробки і впровадження інтегрованих систем моніторингу та управління якісними параметрами технологічного впливу. Однак функціональні можливості таких систем, як правило, не використовуються повною мірою, оскільки є адаптованими до конкретних конструктивних особливостей різноманітних технологічних вібромашин, що знижує ефективність застосування.

Тому розробка автономних систем моніторингу та управління основних характеристик вібраційного устаткування зі складною траєкторією руху є актуальним завданням дослідження, а її рішення має велике науково-практичне значення.

### **3. Ціль та задачі дослідження**

Проведені дослідження ставили за мету розробити автономну систему керування режимними параметрами вібраційного змішувача сипких матеріалів, що дозволяє отримати високооднорідну суміш при мінімальних енерговитратах на її приготування.

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати наступні задачі:

- проаналізувати особливості поведінки сипкої сировини за умови вібраційного впливу;
- розробити структурну схему та практичну реалізацію автономної системи керування режимними параметрами вібраційної машини для змішування сипкої

сировини. Дана система повинна функціонально поєднувати блок аналізу амплітудно-частотних характеристик вібромашини та блок системного керування її приводним механізмом;

– встановити ефективні режимні параметри процесу приготування багатокомпонентного преміксу у вібраційній машині за умови використання розробленої системи керування.

#### **4. Матеріали та методи дослідження впливу режимних параметрів розроблених вібромашин на ефективність протікання процесу змішування**

##### **4. 1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експерименті**

Для оцінки процесу змішування у вібраційних машинах було обрано вітамінно-мінеральний премікс для свійських птахів «ДОЛЬФОС Д».

Склад даного преміксу містить: карбонат кальцію, хлорид натрію, вуглекислий кальцій магній, сухі кормові дріжджі, монокальцитфосфат, оксид магнію, гліцерол.

Вітаміни: Е 672, А 500000 МО, Е 671, D<sub>3</sub> 100000 МО, Е 675 мг, В1 45 мг, Пантотенна кислота 260 мг, Фолієва кислота 5 мг, Холін 1000 мг. Мікроелементи: Е1 Залізо (сульфат заліза (II)), моногідрат 700 мг, Е2 Йод (йодат калію) 12 мг, Кобальт (гідроксикарбонат кобальту (II) моногідрат) 10 мг, Е4 Мідь (сульфат міді, пентагідрат) 100 мг, Е5 Марганець (оксид марганцю (II)) 800 мг, Е6 Цинк (оксид цинку) 720 мг, Е6 Цинк (сульфат цинку моногідрат) 180 мг, Е8 Селен (селенат (IV) натрію) 5 мг. Амінокислоти: сульфат L – Лізин і побічні продукти ферментації 17,9 г, DL – Метіонін + Цистин технічно чистий 6,4 г, кальцієва сіль гідроксианалога метіоніна 4,5 г. Ензими: 4a12 6 – фітаз (ЕС 3.1.3.26) 20 800 PPU. Антиоксиданти: Е 324 Ethoxyquin 533,3 мг, Е 321 ВНТ 588 мг, Е 310 Propyl gallate 100 мг. Консерванти: Е 330, Лимонна кислота 1000 мг.

Для реєстрації частоти обертання приводного вала було використано безпровідний тахометр UNI – T UT372. Керування та зміну частоти обертання вала електродвигуна здійснювали за допомогою автотрансформатора АОСН-20-220-75, який призначений для роботи зі змінним струмом. Для визначення енергетичних характеристик досліджуваної машини використовувався електронний ватметр ЕМФ – 1, який призначений для вимірювання споживаної потужності у мережі 220В, 16А (максимум) з підключенням через побутову розетку.

Амплітудно-частотна характеристика дає можливість оцінити технологічні можливості розробленого вібровідцентрового, вибрати необхідні робочі режими для експлуатації машини в певних умовах. Для встановлення амплітудно-частотних характеристик було розроблено акселерометричний реєстратор коливного спектру виконавчого органу вібромашини.

При побудові цієї залежності знімаємо значення амплітуди коливань для різних режимів роботи машини в певних точках змішувальної камери і приводного вала машини. Складові АЧХ визначаємо для випадків: відсутність завантаження, при використанні робочого матеріалу. Для схожих режимів роботи можна визначити енергетичну характеристику, при цьому величину потужності привода знімаємо по даним електричним приладам пульта управління.

Основними складовими розробленого реєстратора амплітудно-частотних характеристик є мікроконтролер ATmega8, акселерометр LIS302DL, карта пам'яті microSD 2Gb, форматована в файловій системі FAT32 та комутатор (рис. 1, 2). Для роботи пристрою створено програмний інтерфейс на основі операційної системи WINDOWS.

Комутатор, розміщений на передній панелі пристрою, активізує режим запису даних в запам'ятовуючий пристрій, який живиться від автономного джерела електроенергії. Для зчитування даних необхідне провідне з'єднання з USB-портом комп'ютера та установка режиму зчитування даних, який реалізується натисканням віртуальної кнопки «LEAD FLASH». Відповідними віртуальними кнопками здійснюється вибір вимірюваної величини та просторових координат графіків X, Y, Z. Для безпосереднього (on line) виводу інформації на комп'ютер через інтерфейс USB необхідно перевести комутатор у відповідне положення та виконати натискання віртуальних кнопок «LEAD LIS302DL», «START».

Принцип роботи розробленого реєстратора полягає в наступному. Приєднують датчик реєстратора до вібромашини та вмикають електродвигун. Внаслідок коливного руху вібромашини, відбувається активація вмонтованого акселерометра, який починає запис амплітудно-частотних характеристик на мікрокартку пам'яті. Після зупинки машини за допомогою програмного забезпечення і адаптивного шнура отримані АЧХ інтерпретуються у вигляді графічних залежностей і цифрової матриці даних.

Розроблене апаратне і програмне забезпечення дозволяє аналізувати вібропереміщення, віброшвидкість, віброприскорення та інтенсивність коливань в робочому режимі вібраційної машини зі складною траєкторією руху виконавчих органів.

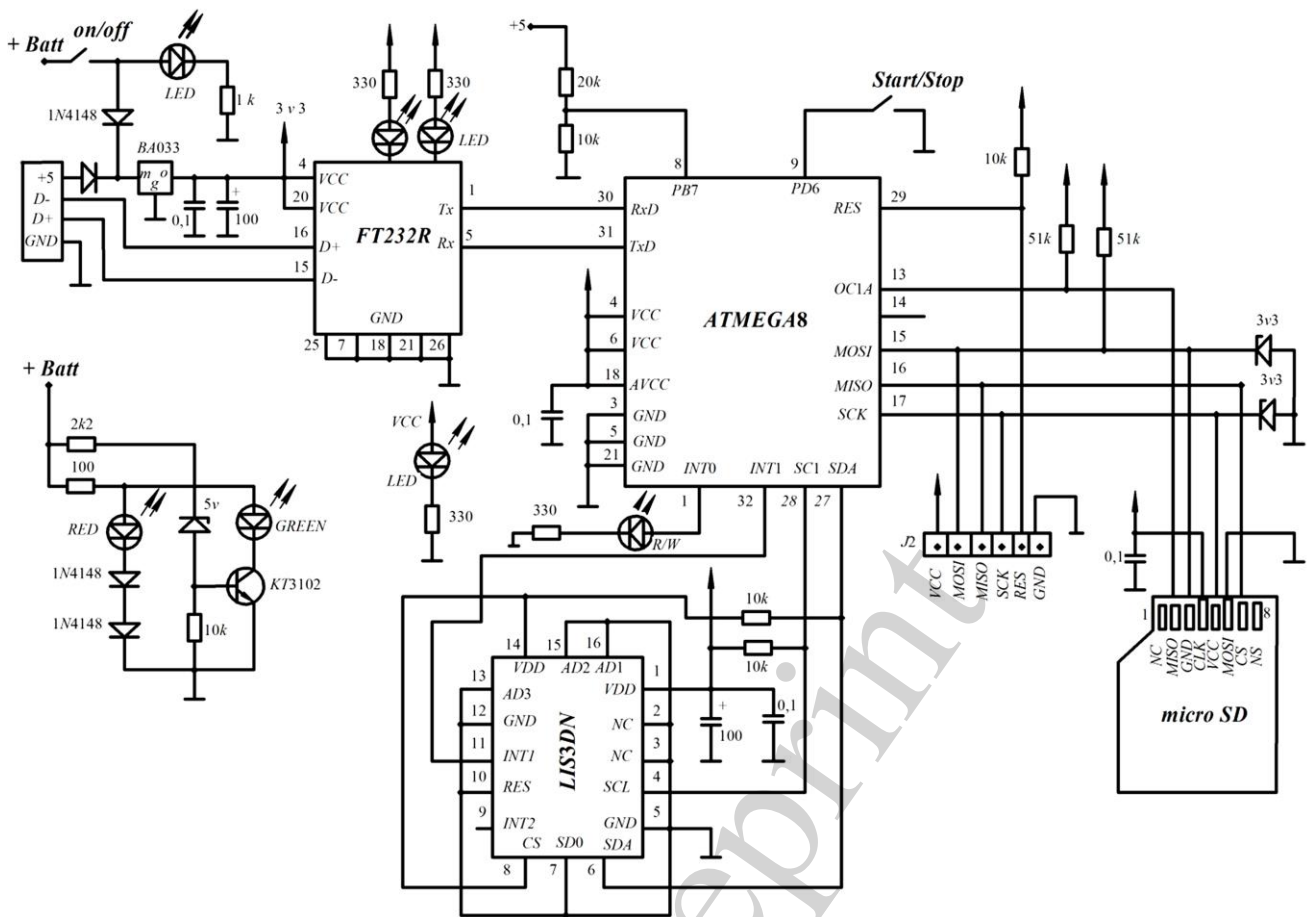


Рис. 1. Апаратно-електронна схема розробленого акселерометричного комплексу

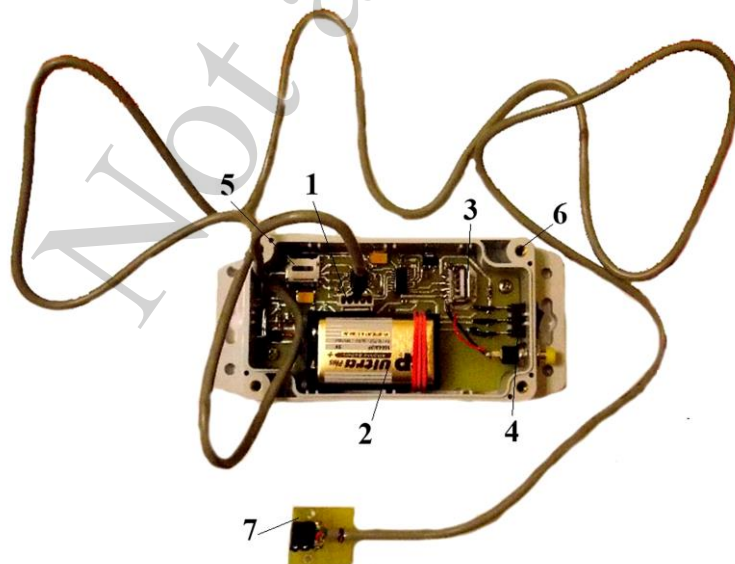


Рис. 2. Загальний вигляд пристрою: 1 – мікропорт для приєднання датчика акселерометра; 2 – батарейка живлення; 3 – карта пам'яті; 4 – кнопка увімкнення живлення; 5 – адаптивний мікропорт для зчитування даних; 6 – корпус акселерометра; 7 – акселерометр

Для реалізації процесу приготування високооднорідних сипких субстанцій було спроектовано та виготовлено дослідну модель вібровідцентрового змішувача (рис. 3) [15, 16]. Запропонована конструкція реалізує ідею комбінованої взаємодії вібраційного та обертового руху виконавчого органа з можливістю змішування у псевдозрідженому стані оброблюваного середовища.

Принцип роботи даної конструкції полягає в такому. Після завантаження необхідної кількості сировини через патрубок в циліндричний контейнер для приготування однієї партії продукції вмикають електродвигун та вібропривод, що призводить до забезпечення до плоского коливання підпружиненої платформи. В свою чергу крутний момент від електродвигуна через еластичну муфту, приводний вал та шестерню створює обертання вінця і, як наслідок, циліндричного контейнера із спіралеподібним інтенсифікатором. Після досягнення необхідної однорідності матеріалу двигуна і вібропривод вимикають та вивантажують сировину через патрубок.

Такий обертовий та коливальний технологічні рухи виконавчого органа змішувача дає змогу значно послабити дію адгезійних сил, підвищити циркуляційний рух оброблюваного матеріалу і, як наслідок, покращити показники якості вихідної суміші. В результаті механічної взаємодії вібрації, інерційного та гравітаційного ефектів на виконавчий орган змішувача та масу продукції має місце значна інтенсифікація процесу перемішування.

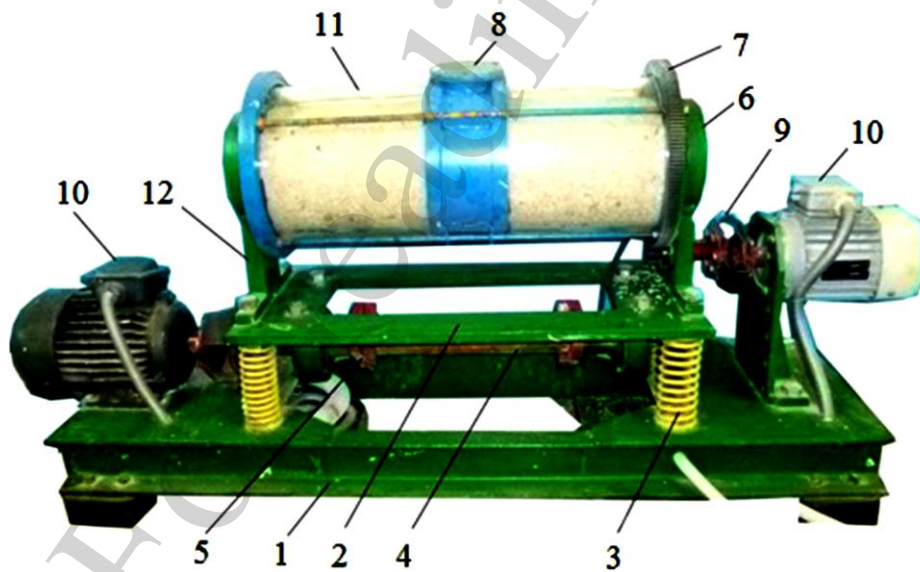


Рис. 3. Загальний вигляд вібровідцентрового змішувача: 1 – станина; 2 – коливна платформа; 3 – пружні елементи; 4 – приводний вал; 5 – дебаланси; 6 – підшипникові вузли; 7 – зубчастий вінець; 8 – завантажувальна горловина; 9 – еластична муфта; 10 – електродвигун; 11 – змішувальна камера; 12 – стійки

Структурна модель управління та аналізу робочих параметрів вібровідцентрового змішувача сипких матеріалів відображено на рис. 4.

Експериментальна модель змішувача містить приводну платформу 1 розміщену на пружних елементах 2. На платформі 1 за допомогою стійок 3, 4 з підшипниковими вузлами 5, 6, змонтовано змішувальний контейнер 7, який міс-

тять горловину для завантаження та розвантаження сипкої сировини 8. На торцевій стороні даного контейнера жорстко розміщений вінець 9, який входить в зчеплення із шестернею 10, яка розміщена на приводному валу електродвигуна 11. З низу до приводної платформи 1 жорстко прикріплений керований дебалансний вібропривод 12, що з'єднується із блоком керування 13. Один із входів блоку керування 13 з'єднано із виходом компаратора 17, інші два входи з'єднані відповідно із акселометричним аналізатором 19 та пристроєм реєстрації кутової швидкості 20 приводного вала вібропривода. Структура схема блоку керування також містить три виходи, які в свою чергу з'єднанні з дебалансним віброприводом 12, одним із входів блоку синтезу та встановлення режимних параметрів 16 та входом аналізатора зсуву фаз 14.

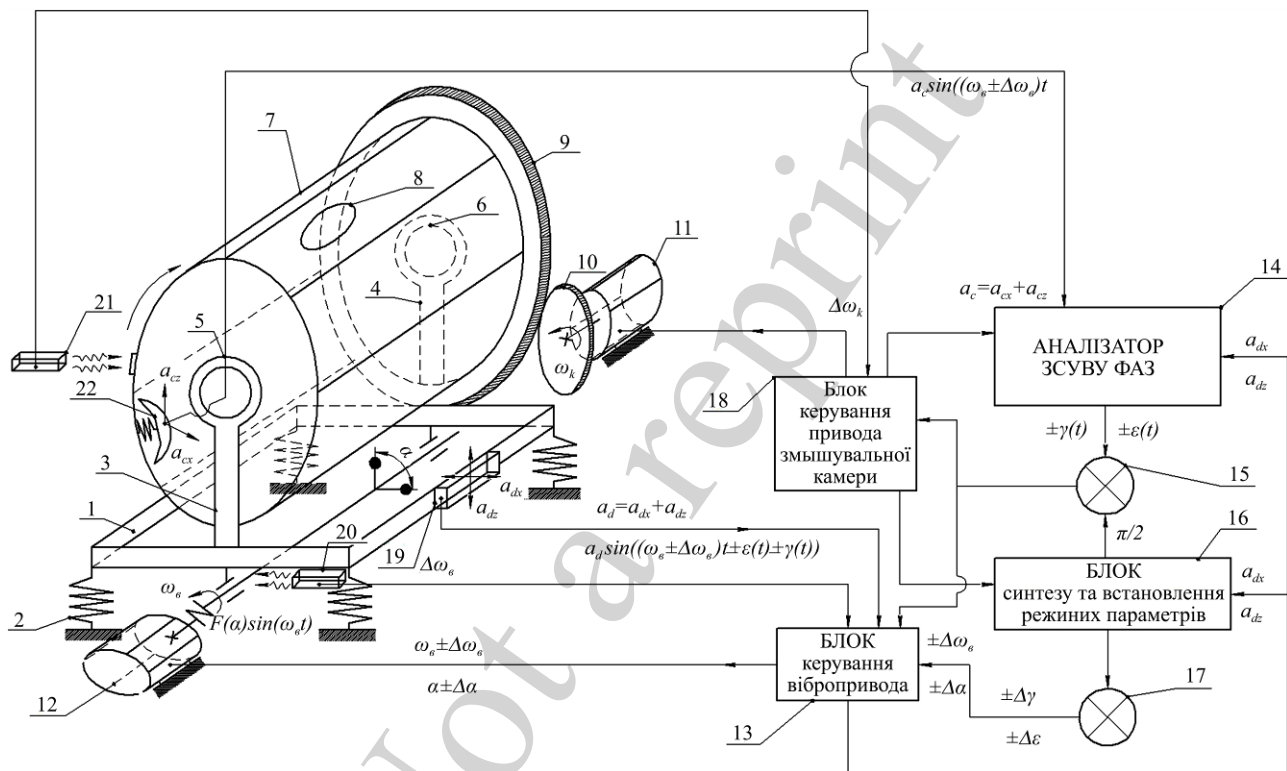


Рис. 4. Структурна модель управління та аналізу робочих параметрів віброзмішувача сипких матеріалів

Другий вхід блоку синтезу та встановлення режимних параметрів 16 з'єднаний з одним з виходів блоку керування приводу змішувальної камери 18, інші виходи даного блоку відповідно з'єднанні з електродвигуном 11 та аналізатором зсуву фаз 14.

Для оцінки та корегування швидкості обертання змішувальної камери блок 16 має два входи. Перший для надходження інформації з пристрою 21, другий – для інформації від компаратора 15. В свою чергу компаратор 15 з'єднаний з входом аналізатора зсуву фаз 14 та входом блоку синтезу та встановлення режимних параметрів 16. Для оцінки псевдозріженого стану оброблюваного матеріалу аналізатор 14 з'єднано з акселометричним пристроєм 22.

Для реалізації ефективного процесу змішування сипких матеріалів при мінімальних питомих енерговитрат необхідно забезпечити оптимальні параметри вібраційного впливу, що реалізується у змішувальному контейнері 7. За даних параметрів величина неоднорідності вихідної суміші  $V_c$  (%) прямує до нуля.

Увімкнення дебалансного вібропривода 12 та електродвигуна 11 створює комбіновану силову та моментну незрівноваженість ексцентрично розміщених мас. Коливний та обертовий рух змішувального контейнера 7 характеризується віброприскоренням  $a_d$ , кутовою швидкістю приводного вала  $\omega_b$  та кутовою швидкістю обертання контейнера  $\omega_k$ . Внаслідок поступального зміщення відносно вертикальної та горизонтальної осі виконавчий орган машини здійснює рух за еліптичною траєкторією.

Слід відзначити, що дія вібрації дає можливість значно зменшити зусилля, необхідне часткам сипучого середовища для їх взаємного переміщення між собою.

При зростанні прискорення силового поля  $a \gg g$  має місце подальше зменшення ефективного коефіцієнта тертя за рахунок повного або часткового відриву часток одна від одної та відносно віброуючої поверхні. Експериментальні дані свідчать, що ефективний коефіцієнт тертя може зменшитися в 40–50 разів.

Серед основних стадій обробки сипкого матеріалу, можна виділити віброзрідження, вібросегрегацію та віброкипіння. Причому, найбільш негативною стадією є вібросегрегація або сепарація матеріалу (коли сили, що виштовхують частки меншої щільності, стають більшими за сили тертя в середовищі). Варто відзначити, що інтенсивне перемішування матеріалу спостерігається саме на стадії віброкипіння.

Перехід від віброзрідження до віброкипіння характеризується зниженням ефективної в'язкості на 2 порядки.

При цьому процес вібраційного перемішування залежить не тільки від фізико-механічних властивостей середовища, але і від конструктивних особливостей вібромашини. Швидкість даного процесу досягає свого піка при максимальному розпушуванні шару середовища та при подальшому збільшенні параметрів вібрації починає зменшуватись.

Передача енергії від джерела вібрації вглибину маси завантаження відбувається внаслідок переміщення ударного імпульсу в ньому, який затухає по мірі здолання сил тертя при непружних деформаціях, а також внаслідок мікрорізання, дроблення та інших факторів. При збільшенні частоти енергія коливань локалізується в більш тонкому шарі взаємодіючих часток та не встигає проникнути всередину технологічного середовища. В свою чергу, підвищення амплітуди коливань при постійному значенні віброприскорення сприяє зростанню глибини проникнення ударних імпульсів в умовах вібраційного поля.

Такі результати обґрунтовують процес розповсюдження коливань в масі завантаження як релаксаційний, для протікання якого потрібний певний час. Варто відзначити, що зона віброзрідження в технологічному завантаженні вібромашини спостерігається до величини коефіцієнта  $k = 2,4 - 2,5$ . Також окрім кількісної зміни границь зони віброзрідження та віброкипіння ніяких якісних



змін в поведінці технологічного середовища в обмеженому віброуючому просторі робочої камери не спостерігається. До того ж, по мірі збільшення частоти коливань відчутнішими виявляються сили в'язкого тертя, хоча величина є незначною порівняно з силами сухого тертя, що підтверджується в роботах.

Безперервний контакт технологічного завантаження з віброуючою поверхнею забезпечує розсіювання енергії в середовищі, усереднене за період коливань.

Частотний режим роботи вібромашини визначає, здебільшого, ступінь динамічного впливу на елементи конструкції коливальної системи. При цьому слід відзначити найбільш поширені резонансний та зарезонансний режими.

Вплив резонансного режиму на коливальні технологічні системи можна поділити на внутрішній та зовнішній. Зовнішній вплив зумовлений зависанням приводного механізму на резонансній частоті, коли двигун починає працювати в режимі трансформатора. Це призводить до швидко нагрівання двигуна та виходу його з ладу. Також слід відзначити що в резонансному режимі роботи вібромашини спостерігається різке зростання амплітуди коливань. Дане явище зумовлює зношення опорних вузлів приводного валу віброзбуджувача при проходженні через резонанс. Даний перехід є еквівалентним роботі підшипникових вузлів протягом 100–120 годин в установленому режимі.

Таким чином, незважаючи на високу динамічність резонансного режиму при мінімальних енерговитратах, означені недоліки обмежують його технологічне застосування.

Зарезонансний технологічний режим характеризується значно більшою стабільністю на робочих частотах. Завдяки більш жорсткій підвісці робочого контейнера реалізуються необхідні вимоги щодо віброзахисту конструкції вібромашини. При даному режимі роботи виконується принцип автобалансування коливальної системи. Даний принцип полягає в тому, що при значно більших частотах за власні частоти коливань, неврівноважені маси схильні до самоцентрування. Тобто, центр мас прагне до розташування на осі обертання. В результаті істотно зменшуються неврівноважені маси, що передаються на опори приводного валу. Аналізуючи діапазон між резонансною частотою та частотою усталеного режиму можна відзначити почергове збільшення амплітуди коливань піки якої зменшуються по мірі наближення до усталеного режиму.

Тобто, оптимальні режимні параметри розробленої вібромашини та мінімальні енергозатрати на реалізацію досліджуваного процесу змішування будуть спостерігатися в зарезонансному режимі, тобто при сталому значенні коефіцієнта динамічного режиму змішувальної камери в межах 2,4-2,5.

Частота власних коливань змішувального контейнера  $\omega_0 = f(m)$  залежить від маси технологічного завантаження, яка в свою чергу залежить від співвідношення між основними інгредієнтами сипкого середовища та необхідного об'єму готової продукції в кінцевому результаті.

Швидкість  $\omega_g$  дебалансного вібропривода 12 різниться від власної частоти коливань змішувальної камери на  $\omega_0 = f(m)$  та частоти коливань оброблюваного матеріалу на  $\omega_0 = f(m_1)$ . Тобто, існує різниця збурення силових імпульсів

між вимушеною силою коливань вібромашини  $F(\alpha)\sin(\omega t)$ , вимушеними коливаннями оброблюваного матеріалу  $a\sin(\omega \pm \Delta\omega)t$  та вимушеними коливаннями  $a\sin((\omega \pm \Delta\omega)t \pm \varepsilon(t) \pm \gamma(t))$  змішувальної камери 7.

Характеристика складових віброприскорення  $a_d$  змішувального контейнера 7 та кутова швидкість приводного валу  $\omega_v$ , постійно надходить з акселерометричного аналізатора 19 та тахометра 20 до блоку керування вібропривода 13, в блок синтезу та встановлення режимних параметрів 16 та у аналізатор зсуву фаз 14. В свою чергу із блоку керування приводом змішувальної камери 18 постійно надходить сигнал про швидкість обертання виконавчого органу машини до аналізатора 14, який паралельно проводить моніторинг рівня псевдозрідженого стану оброблюваного матеріалу у формі  $a\sin(\omega \pm \Delta\omega)t$ .

В процесі роботи блоки 13 та 18 постійно передають в аналізатор зсуву фаз 14 сигнал (інформацію) про дійсну (фактичну) частоту вимушуючої сили керованого дебалансного вібропривода 12. Також, дані блоки сприймають частоту коливань змішувального контейнера 7 та оброблюваного матеріалу. В результаті цього, в детекторі фаз 14 проводиться визначення зсуву фаз  $\pm\varepsilon(t)$ ,  $\pm\gamma(t)$  між вимушеними коливаннями контейнера 7, циклічною вимушуючою силою дебалансного вібропривода 12 та оброблюваним матеріалом.

Для різної маси завантаження існує своя власна частота коливань  $\omega_0$ , яка характеризується кутом  $\alpha(t)$ . Аналіз кута  $\alpha(t)$  дозволяє встановити значення та напрям поправки  $\pm\Delta\omega$  частоти циклічної вимушуючої сили  $\omega_v$  вібропривода 12 та забезпечити постійну рівність  $\omega_e \approx \omega_0$ . Тому інформація про зсув фаз  $\varepsilon(t)$  із аналізатора фаз 14 поступає в компаратор 15 де порівнюється із блоком 16 синтезу та встановлення режимних параметрів, із точки зору енергозбереження, кутом  $\pi/2$ . Кут рівний  $\pi/2$  між вимушеними коливаннями змішувальної камери 7 та циклічною вимушуючою силою керованого дебалансного вібропривода 12 буде спостерігатися за резонансного режиму роботи віброзмішувача.

Динамічний стан керованої вібросистеми  $\pm\Delta\varepsilon$  15 у вигляді різниці  $\pi/2 - \varepsilon(t) - \gamma(t)$  в блок керування вібропривода 13 та блок керування приводом змішувальної камери 18.

Тоді як в блоці синтезу та встановлення режимних параметрів 16 базуючись на величинах та її знаках  $\pm\Delta\gamma$ ,  $\pm\Delta\varepsilon$  на базі класичних законів керування, формуються поправочні коефіцієнти  $\pm\Delta\omega_k$ ,  $\pm\Delta\omega_e$  частоти циклічної вимушуючої сили  $\omega_v$  керованого вібропривода 12. Отримане значення її вимушуючої сили  $\omega_e \pm \Delta\omega$  дебалансного вібропривода 12 у на базі сигналу передається в аналізатор фаз 14 де в безперервному режимі проводиться визначення  $\varepsilon(t)$ . Як результат даної функціональної взаємодії реалізується постійна в часі адаптація роботи розробленого віброзмішувача до зарезонансного режиму експлуатації, тобто оптимізація роботи віброзмішувача з точки зору енергозбереження.

Блоки моніторингу 13, 14, 16, 18 забезпечують зарезонансний режим роботи вібромашини при зміні завантаження сировиною.

Розроблена структура забезпечує оптимальні робочі значення  $\omega_0$  для експлуатаційних режимів віброзмішувача. Тобто, надає можливість отримати задану неоднорідність суміші  $V_c(\%)$  за мінімальний час обробки  $t(c)$ . Також слід відзначити, що оптимізацію віброприскорення змішувальної камери 7 слід здійснювати так, щоб оброблюваний матеріал постійно перебував у максимально псевдозрідженому стані. З цією метою блок синтезу та встановлення режимних параметрів 16 автоматизовано розраховує значення  $a_d$  необхідного рівня віброприскорення змішувальної камери 1 при кожній індивідуальній за резонансній частоті  $\omega_0$  коливань складових досліджуваної вібросистеми.

Для забезпечення необхідної неоднорідності оброблюваного матеріалу, до компактора постійно надходить кореговане значення віброприскорення  $a_d$  та дійсний рівень віброприскорення машини. В результаті порівняння отримуємо  $\pm\Delta\alpha$  величину і напрям зміни амплітуди циклічної вимушеної сили керованого керованого вібропривода 12. Динамічна зміна основних режимних параметрів розробленої вібромашини циклічної частоти обертання приводного валу керованого дебалансного вібропривода 14 та кут взаєморозміщення дебалансів дозволить забезпечити необхідний оптимальний динамічний стан змішувальної камери 7.

Перевагою даної конструкції є використання енергії корпусу, що коливається, та відсутність додаткового привода. Також слід відзначити, що таке конструктивне виконання машини дає змогу створити безперервну технологічну дію перемішуючих органів на оброблюване середовище.

#### **4. 2. Сутність показників оцінки режимних та якісних параметрів досліджуваного процесу**

Серед технологічних параметрів вібраційної машини, які потрібно врахувати при її проектуванні, можна відзначити особливості реалізації параметрів вібраційного поля та організації циклу обробки продукції.

Основними параметрами вібраційного поля можна вважати частоту  $\omega$  та амплітуду коливань  $A$ , віброприскорення  $a$ , віброшвидкість  $v$  та віброінтенсивність  $I$ .

Віброприскорення є одним із основних параметрів, що визначають поведінку часток технологічного середовища вібромашини. Коли величина віброприскорення  $a$  наближається до прискорення вільного падіння  $g$ , сипке середовище набуває властивості віброзрідження. Разом з ущільненням спостерігається виникнення текучості та розпушування при істотному зменшенні в'язкості сипучого середовища, що дозволяє характеризувати останнє реологічними параметрами.

Резерви підвищення інтенсивності вібраційної обробки мають місце в машинах з комбінованою силовою дією, яка полягає в поєднанні вібраційного та обертового руху елементів технологічної системи. Об'єктами такого технологічного впливу разом з віброуючим робочим контейнером може бути технологічне середовище.

Загальну енергію коливальної системи можна поділити на кінетичну, потенціальну та роботу сил інерції. В свою чергу до кінетичної енергії відносять енергію коливних та обертових мас приводу. До потенціальної енергії – енергію пружних елементів робочого органу та пружних зв'язків робочого середовища. Серед складових роботи сил інерції варто відзначити вагу інерційних елементів за період коливань та енергію розсіювання. Остання, розсіюється у вигляді теплоти в масі технологічного завантаження та у навколишньому середовищі в результаті в'язкого та сухого тертя. Дані складові не можна рахувати простим сумуванням, так як вони являють собою форми, що взаємно перетворюються одна в одну. Так, енергія обертових мас перетворюється в енергію коливального процесу робочих органів, яка призводить до виникнення циркуляційного руху технологічного завантаження та частково розсіюється на здолаття сил тертя.

В загальному випадку до основних енергетичних параметрів вібрації можна віднести роботу змушуючих сил або моментів та внутрішніх сил опору коливальної системи. Робота зовнішніх сил створюється віброзбуджувачем та витрачається на здолаття сил опору системи та забезпечення коливального руху виконавчих органів вібраційної технологічної машини із заданими параметрами.

Внутрішні сили опору коливальної системи становлять сили реактивного та дисипативного опору.

Крім того, частина енергії, що постачається від зовнішнього джерела, витрачається, як правило, в різних проміжних передачах, муфтах сполучення, в самому електродвигуні та в інших пристроях вібраційної машини. Витрати енергії в механічних передачах залежать від конструктивної схеми вібраційної машини та визначаються в результаті спеціальних кінематичних розрахунків.

Витрати енергії в електродвигуні складаються із витрат у статорі і роторі електромашини. Енергія у статорі витрачається на перемагнічування, на вихровий струм у магнітопроводі статора, на нагрівання струмом обмотки статора. В роторі енергія витрачається при нагріванні обмотки та в магнітопроводі. Останні практично дорівнюють нулю внаслідок малого значення частоти потоків в електричному ланцюзі ротора. Витрати енергії на перемагнічування, вихреві потоки в магнітопроводі постійні для даного типу електродвигуна і не залежать від навантаження на валу двигуна. Витрати енергії на нагрівання обмоток статора і ротора залежать від величини струму, яка визначається корисною потужністю, що необхідна для приводу вібраційної машини.

Для визначення показників якості процесу змішування застосовуємо почасовий метод оцінювання суміші, що ґрунтується на статистичному аналізі, де на основі вибірок здійснюється оцінювання за однією випадковою величиною. Для цього із суміші виділяємо один ключовий компонент, а всі інші компоненти об'єднуємо разом. Про якість змішування робимо висновок за ступенем розподілу ключового компонента в масі іншого умовного компонента. Таким чином, у двокомпонентній суміші випадковою величиною  $M$  є вміст ключового компонента в мікрооб'ємах. Випадкова дискретна величина  $M$  може бути повністю охарактеризована, якщо є закон розподілу, математичне сподівання  $X$ , дисперсія  $D$  або середнє квадратичне відхилення  $S$ . Більшість дослідників як основу

критерію оцінювання якості суміші приймають середнє квадратичне відхилення вмісту ключового компонента у пробах, відібраних із результуючої суміші:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{m})^2}{n - 1}}, \quad (1)$$

де  $M_i$  – вміст ключового компонента в  $i$ -ій пробі;  $\bar{m}$  – середнє арифметичне вмісту ключового компонента у всіх пробах;  $n$  – загальне число вибірок.

При великій кількості вибірок величина  $\bar{m}$  за ймовірнісним прогнозуванням дорівнює математичному сподіванню  $X$  випадкової величини  $M$ . Середнє квадратичне відхилення залежить від величини  $\bar{m}$  і має її розмірність. Відбір проб реалізуємо пробовідбірником в шаховому порядку з чотирьох глибин контейнера. Мінімальна маса проби обчислюється за формулою

$$G_M = \frac{10^4 \pi d^3 \rho}{c_0 + 1,5c_0} \approx \frac{1,26 \cdot 10^4 d^3 \rho}{c_0}, \quad (2)$$

де  $d$  – діаметр частинок суміші, см;  $\rho$  – насипна густина частинок суміші, г·см<sup>-3</sup>;  $c_0$  – значення заданої концентрації ключового компонента.

## 5. Результати досліджень режимних параметрів вібромашини та оцінки процесу змішування

Для встановлення режимних параметрів розробленої вібровідцентрового змішувача було проведено оцінювання кінематичних та швидкісних характеристик її виконавчого органа.

Амплітуда коливань змішувальної камери на рис. 5 поділяється на три характерних зони: дорезонансну при  $\omega=0-31$  рад·с<sup>-1</sup>, резонансну  $\omega=36-57$  рад·с<sup>-1</sup> та зарезонансну  $\omega=67-118$  рад·с<sup>-1</sup>, де спостерігається стабілізація амплітуди коливань.

Максимальні значення амплітуди коливань у дорезонансному режимі не залежно від ступеня завантаження сировини становлять  $A=3$  мм. Тоді, як в резонансному режимі значення амплітуди коливань становлять: без завантаження  $A=5,8$  мм; при  $r=1/2-A=5,3$  мм; при  $r=3/4-A=5$  мм. Після чого в зарезонансному режимі значення амплітуди перебуватиме в діапазоні  $A=2-2,2$  мм.

Аналіз вищеозначених даних дозволив зробити висновок, що зі збільшенням ступеня завантаження сировини амплітуда коливань зменшується, це особливо помітно в резонансному періоді, дане явище зумовлене значним зростанням дисипативних сил оброблюваного матеріалу та реалізує зміщення амплітуди коливань контейнера в напрямку збільшення кутової швидкості приводного вала вібробуджувача.

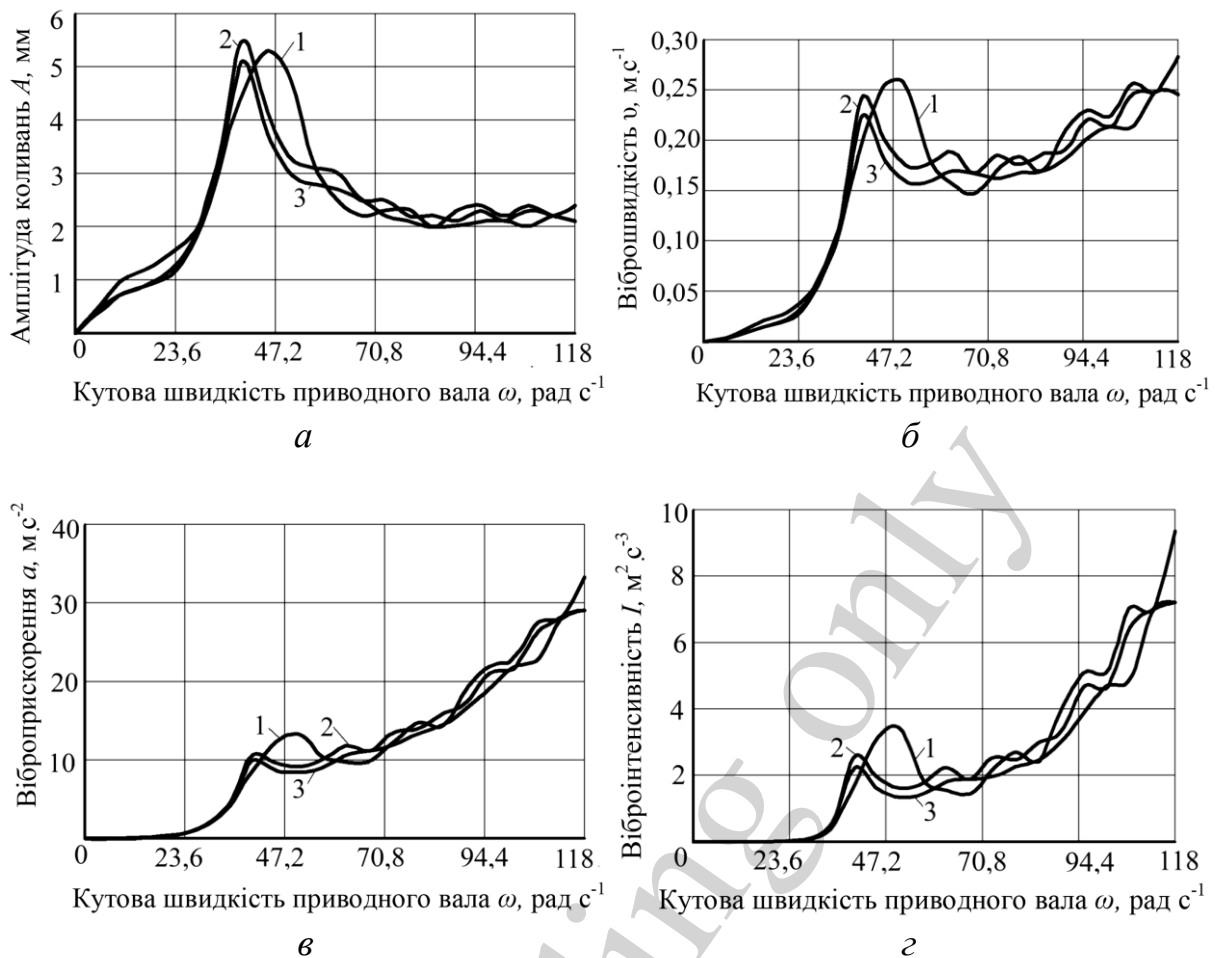


Рис. 5. Амплітудно-частотні та швидкісні характеристики машини залежно від кутової швидкості приводного вала  $\omega$  та коефіцієнта завантаження сировини  $r$ :  
 а – амплітуда коливань; б – віброшвидкість; в – віброприскорення;  
 г – віброінтенсивність; 1 – без технологічного наповнювача;  
 2 – при  $r=1/2$ ; 3 – при  $r=3/4$

При цьому за даного рисунку видно, що значення віброшвидкості та віброприскорення при кутовій частоті приводного вала  $\omega=118$  рад·с<sup>-1</sup> сягають в діапазоні  $v=0,25-0,27$  м·с<sup>-1</sup>,  $a=28-30$  м·с<sup>-2</sup> та не відзначаються значним діапазоном величин. Максимальне значення інтенсивності коливань  $I=7-10$  м<sup>2</sup>·с<sup>-3</sup> виконавчого органа вібромашини спостерігаються при  $\omega=118$  рад·с<sup>-1</sup>. Даний режим обробки характеризується значним динамічним стан виконавчого органа, як наслідок активною циркуляцією сипкої маси.

Для оцінення енерговитрат досліджуваної вібромашини було проведено серію експериментальних досліджень залежно від зміни ступеня завантаження та коефіцієнта вібрації  $k$ .

Аналіз рис. 6 засвідчив, що зростання коефіцієнта вібрації виконавчого органа машини з 1,2 до 5,2 супроводжується підвищенням енерговитрат віброзбуджувача з  $N_{пр}=0,4$  кВт·год до  $N_{пр}=1,0$  кВт·год та зменшенням енерговитрат на приводі змішувальної камери з  $N_{зм.к}=0,8$  кВт·год до  $N_{зм.к}=0,4$  кВт·год. Це обумовлює появу мінімуму сумарних енерговитрат на

реалізацію активної обробки сировини за умови безперервного підкидання частинок сипкого матеріалів.

Базуючись на вищезазначених даних, можна зробити висновок, що зміна коефіцієнта вібрації є одним з домінуючих факторів сумарних енерговитрат розробленої вібромашини за реалізації процесу змішування.

Дане зменшення енерговитрат на привод змішувальної камери зі зростанням коефіцієнта режиму вібрації пояснюється зменшенням ефективних коефіцієнтів внутрішнього та зовнішнього тертя під дією вібраційного поля.

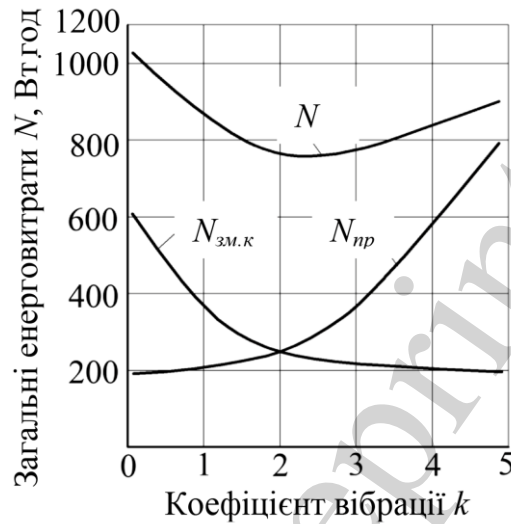


Рис. 6. Залежність енерговитрат віброзмішувача від коефіцієнта вібрації  $k=a^2g^{-1}$  (при  $n_{зм.к}=70\text{ с}^{-1}$ ,  $n_{пр}=1100\text{ с}^{-1}$ , ступінь завантаження  $\frac{3}{4}$ );  
 $N_{\Sigma}=N_{пр}+N_{зм.к}$  – сумарні енергетичні витрати

Аналіз (рис. 7) засвідчив, що енерговитрати привода змішувальної камери  $N_{зм.к}$  при  $n_{зм.к}$  до  $70\text{ с}^{-1}$  та збільшенні значення  $k$  від 1,2 до 5,2 зростають на 50 Вт·год.

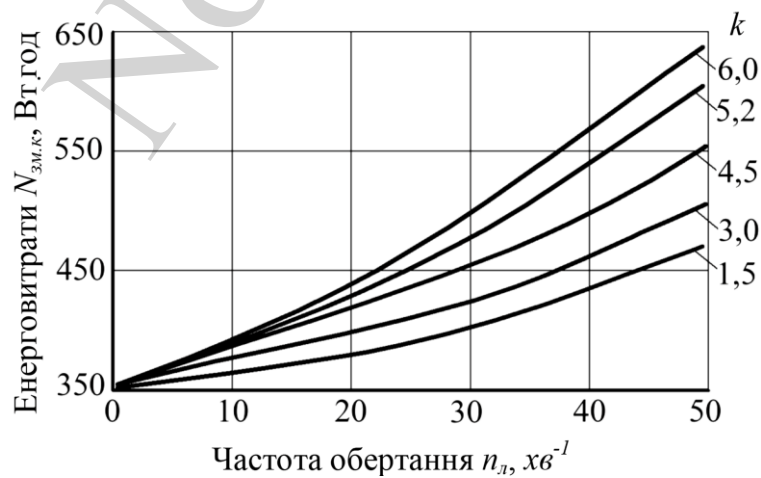


Рис. 7. Залежність енерговитрат привода змішувальної камери від частоти обертання контейнера  $n_n$  та зміни коефіцієнта режиму вібрації  $k$

На рис. 8, 9 відображено серію експериментальних кривих зміни сумарних енерговитрат та загальної амплітуди коливань при зміні величини змушуючої сили та коефіцієнта завантаження оброблюваним матеріалом.

Отримані дані засвідчили практично пропорційне зростання амплітуди коливань виконавчого органа машини та споживаної потужності. Наприклад, без завантаження оброблюваного матеріалу: при  $k=1,5-N_{\Sigma}$  становить 0,9 кВт·год,  $A=1,5$  мм; при  $k=4,5-N_{\Sigma}=1,0$  кВт·год,  $A=2,5$  мм; при  $k=1,5-N_{\Sigma}=0,9$  кВт·год,  $A=1,5$  мм;  $k=5,2-N_{\Sigma}=1,1$  кВт·год,  $A=2,8$  мм.

Внаслідок підвищення ступеня завантаження змішувальної камери амплітуда коливань контейнера зменшується в 1,5 раза, тоді як енерговитрати загальні зростають в 1,6 раза.

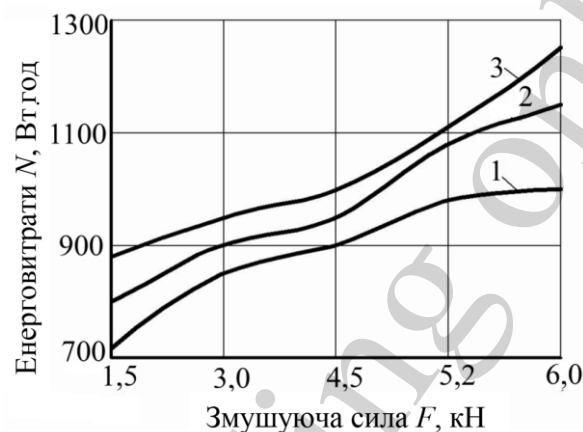


Рис. 8. Залежність енерговитрат вібротурбини від величини змушуючої сили  $F$  та коефіцієнта завантаження оброблюваної сировини  $r$ : 1 – при  $r=3/4$ ; 2 – при  $r=1/2$ ; 3 – без технологічного наповнювача

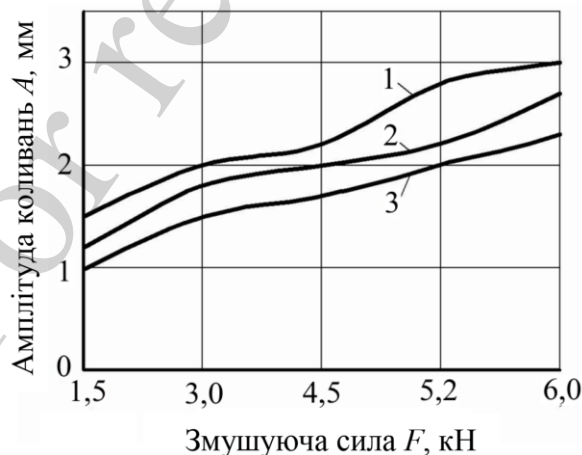


Рис. 9. Залежність амплітуди коливань від змушуючої сили  $F$  та коефіцієнта завантаження оброблюваної сировини  $r$ : 1 – при  $r=3/4$ ; 2 – при  $r=1/2$ ; 3 – без технологічного наповнювача

Також, як видно з рис. 10, зростання кутової швидкості приводного вала змішувача супроводжується майже квадратичним зростанням сумарних енерго-



витрат  $N_{\Sigma}$ , так за  $r=3/4$  та при  $\omega=20$  рад·с<sup>-1</sup> –  $N_{\Sigma}=0,2$  кВт·год, тоді як при  $\omega=118$  рад·с<sup>-1</sup> –  $N_{\Sigma}=1,2$  кВт·год.

Варто також відзначити збільшення загальних енерговитрат залежно від коефіцієнта завантаження оброблюваної сировини, так, за кутової швидкості  $\omega=118$  рад·с<sup>-1</sup> загальні енерговитрати машини  $N_{\Sigma}$  набудуть значень: без завантаження –  $N_{\Sigma}=1000$  кВт·год, при  $r=1/2$  –  $N_{\Sigma}=1,1$  кВт·год; при  $r=3/4$  –  $N_{\Sigma}=1,25$  кВт·год.

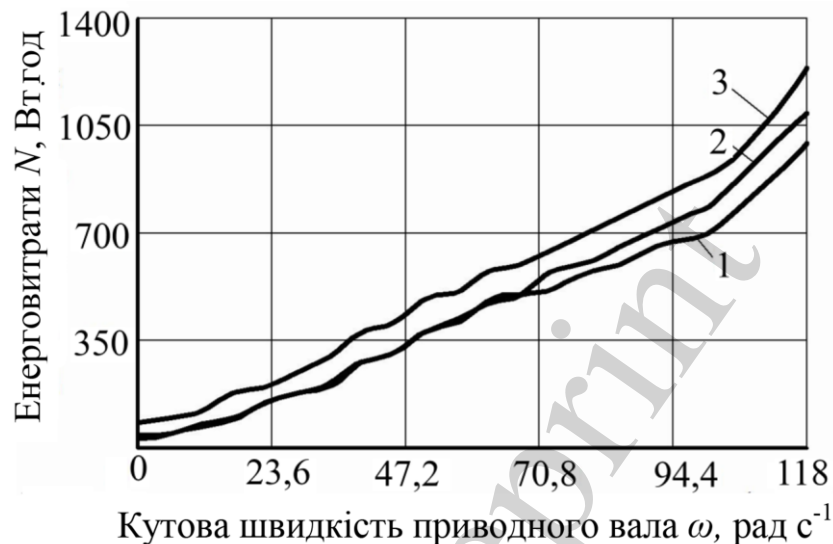


Рис. 10. Залежність сумарних енерговитрат досліджуваної вібромашини від кутової швидкості приводного вала  $\omega$  та коефіцієнта завантаження оброблюваної сировини  $r$ : 1 – при  $r = 3/4$ ; 2 – при  $r=1/2$ ; 3 – без технологічного наповнювача

Під час проведення експериментальних досліджень для оцінювання показників якості процесу змішування використовувався матеріал з вологістю 7–10 %. Оброблюваний матеріал залежно від фізико-механічних характеристик було розділено на дві групи. До першої групи входили ріпак та пшоно з розмірами 1,5–2,0 мм. Тоді, як до другої групи – високодисперсний матеріал у вигляді порошоків з розміром частинок 20–50 мкм.

Аналіз рис. 11, засвідчив зменшення коефіцієнта варіації отриманої суміші за умови лише обертового руху контейнера  $V_c=10$  % за  $t=150$  с, тоді як за умови вібраційного впливу  $V_c=8$  % за  $t=60$  с, а при комплексній вібровідцентровий обробці  $V_c=5$  % за  $t=50$  с.

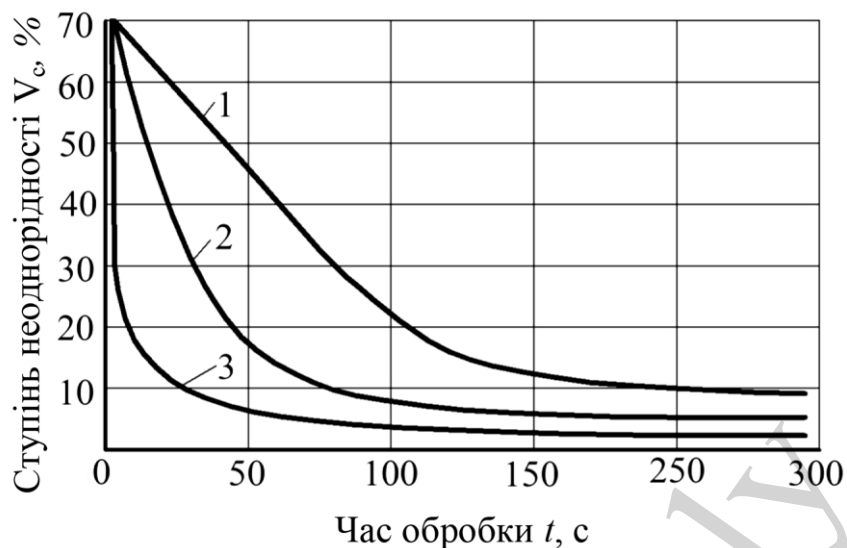


Рис. 11. Залежність ступеня неоднорідності суміші від часу обробки  $t$  та типу технологічного впливу: 1 – відцентровий рух контейнера; 2 – коливний рух контейнера; 3 – вібровідцентровий

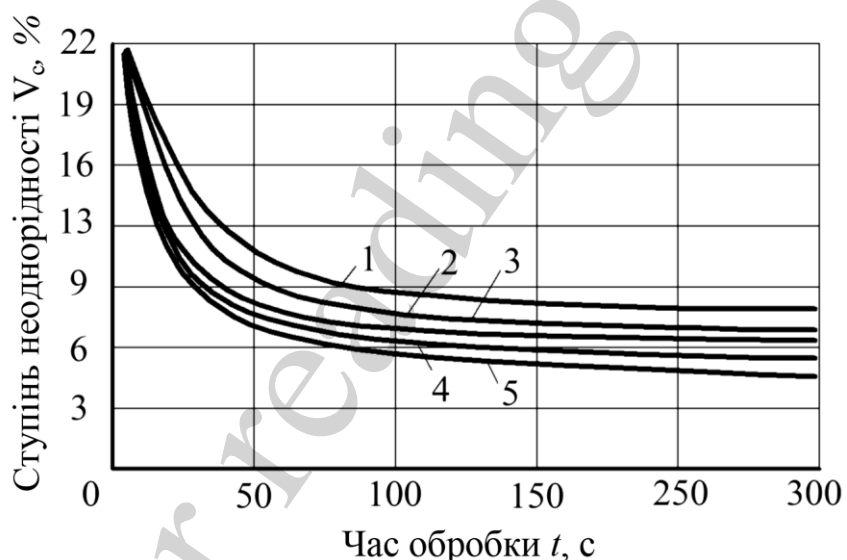


Рис. 12. Залежність ступеня неоднорідності суміші  $V_c$  від часу обробки  $t$  та коефіцієнта вібрації (вібровідцентровий спосіб обробки,  $n_{з.к}=70 \text{ с}^{-1}$ ): 1 –  $k=1,5$ ; 2 –  $k=3$ ; 3 –  $k=4,5$ ; 4 –  $k=5,2$ ; 5 –  $k=6$

Аналіз рис. 12 дозволив встановити, що основна фаза змішування відбувається в перший період обробки, тривалість якого становить  $t=50 \text{ с}$ , а коефіцієнт варіації  $V_c$  залежить від коефіцієнту вібрації  $k$ . Так, при  $\omega=118 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ , частоти обертання змішувальної камери  $n_{з.к}=70 \text{ с}^{-1}$  та часу обробки  $60 \text{ с}$   $V_c$  становитиме при  $k=1,5$  –  $V_c=9 \%$ , тоді як при  $k=6$  –  $V_c=5 \%$ .

У другому періоді ступінь однорідності практично не змінюється, що характеризує настання динамічної рівноваги, після якої подальший процес перемішування є неефективним. Отримані залежності дозволили встановити, що

неоднорідність суміші зменшується із збільшенням тривалості обробки суміші на всіх досліджуваних режимах роботи.

Також варто відзначити, що при збільшенні часу обробки величина коефіцієнта неоднорідності почергово зменшується або зростає, прямуючи до деякого граничного значення. Така поведінка суміші пов'язана з наявністю конвективного механізму процесу, через що й відбуваються коливання площини поверхні контакту змішувальних фаз від максимального до мінімального.

## **6. Обговорення результатів дослідження режимних параметрів вібромашини**

Розроблена система керування дозволила встановити ефективні режимні параметри вібраційної машини для приготування преміксу. Серед яких можна відзначити, що: кутова швидкість приводного валу  $\omega=110-120$  рад/с; амплітуда коливань  $A=2,0-2,2$  мм; віброшвидкість  $v=0,25-0,28$  м/с; віброприскорення в межах  $a=28-30$  м/с<sup>2</sup>; інтенсивність коливань  $I=6-8$  м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>. При даних параметрах за 25–40 секунд однорідність вихідної суміші становить 96–98 %, а енерговитрати вібраційного змішувача сягають:  $N=1000$  Вт·год, при  $\frac{1}{2}$  завантаження;  $N=1100$  Вт·год, при  $\frac{3}{4}$  завантаження;  $N=1250$  Вт·год, при цілковитому завантаженні.

Варто відзначити, що більшість відомих методів керування технологічними параметрами вібромашин, з метою зменшення питомих енерговитрат на реалізацію процесу змішування, полягають у ручному керуванні машини за допомогою зміни напруги або її частоти у електроприводах. Також, для зміни амплітудно-частотних характеристик вібраційної системи застосовують ручну зміну взаєморозміщення неврівноважених мас. Проте вище означені методи керування є трудомісткими та ускладнюють процес корегування режимних параметрів вібромашин залежно від типу оброблюваного матеріалу або його ступеня завантаження у змішувальний контейнер.

Розроблена система є розвитком систем керування, які базуються на адаптованому віброприводі, який має здатність змінювати взаєморозміщення своїх неврівноважених мас під час роботи вібромашини. Проте недоліком даних систем є оцінка лише амплітудно-частотних характеристик самої машини.

Тоді, як в запропонованій системі, блок моніторингу здійснює комплексний аналіз кінематичних та швидкісних характеристик як машини так і динамічного стану оброблюваного матеріалу.

Запропонована система керування є автономною та базується на принципі забезпечення максимально активного динамічного стану оброблюваного сипкого матеріалу. Даний тип обробки базується на передумові створення ефективних циркуляційних потоків які прослідковуються у псевдозрідженому стані матеріалу, що в свою чергу забезпечує зарезонансний режим роботи вібромашини.

Структура даної системи керування містить три основних блоки. Перший блок здійснює оцінку основних кінематичних та швидкісних характеристик вібромашини та сипкої суміші в процесі її обробки. Другий здійснює аналіз вхідних даних та їх розбіжність між собою встановлюючи кореговані значення режимів роботи приводного механізму вібромашини. Третій блок забезпечує ме-

ханічне корегування приводної системи забезпечуючи необхідні режимні параметри роботи вібромашини.

Основним недоліком розробленої системи керування на нашу думку є опосередковане емпіричне оцінювання якісних характеристик приготовленої суміші. Тобто розвитком даних систем керування є впровадження інтегрованого блоку оцінки однорідності суміші в процесі її приготування. Перспективним напрямком даної модернізації є застосування фотоаналітичних пристроїв оцінки однорідності матеріалу на кожному етапі його обробки.

## **7. Висновки**

1. Встановлено, що перспективним шляхом підвищення ефективності процесів змішування сипких матеріалів є застосування вібраційних машин. Внаслідок вібраційного впливу спостерігається збільшення пористості дисперсного середовища та зменшення його щільності. Даний ефект забезпечує складний циркуляційний рух сипкої сировини в змішувальній камері, а як наслідок – рівномірний розподіл частинок матеріалу у всьому об'ємі суміші.

2. Розроблено автономну систему керування режимних параметрів віброзмішувача сипкої сировини. Дана система дозволяє здійснювати активний аналіз та корегування основних кінематичних та швидкісних характеристик вібромашини в процесі її роботи, забезпечує високодинамічний стан обробки сипкої сировини незалежно від її фізико-механічних властивостей та об'єму заповнення змішувальної камери машини.

3. Використовуючи розроблену систему керування встановлено ефективні режимні параметри вібраційної машини для приготування преміксу, які забезпечують мінімальні енерговитрати на приготування високооднорідної суміші.

## **Література**

1. Блехман, И. И. Движение частицы в колеблющейся среде при наличии сопротивления типа сухого трения [Текст] / И. И. Блехман, В. В. Гортинский, С. Е. Птушкина // *Механика в машиностроении*. – 1963. – № 4. – С. 31–41.

2. Гончаревич, І. Ф. Теорія вібраційної техніки та технології [Текст] / І. Ф. Гончаревич, К. В. Фролов. – М.: Наука, 1981. – 320 с.

3. Mizonov, V. Influence of crosswise non-homogeneity of particulate flow on residence time distribution in a continuous mixer [Text] / V. Mizonov, H. Berthiaux, C. Gatumel, E. Barantseva, Y. Khokhlova // *Powder Technology*. – 2009. – Vol. 190, Issue 1-2. – P. 6–9. doi: 10.1016/j.powtec.2008.04.052

4. Roseman, B. Mixing of solids [Text] / B. Roseman // *The industrial Chemist*. – 1973. – Issue 10. – P. 84–90.

5. Gyenis, J. Determination and randomness in mixing of particulate solids [Text] / J. Gyenis, F. Káтай // *Chemical Engineering Science*. – 1990. – Vol. 45, Issue 9. – P. 2843–2855. doi: 10.1016/0009-2509(90)80177-g

6. Potanin, A. A. On models of granular material flow under dynamic conditions [Text] / A. A. Potanin // *Powder Technology*. – 1992. – Vol. 69, Issue 2. – P. 107–117. doi: 10.1016/0032-5910(92)85063-2

7. Mizonov, V. A Markov chain model of mixing kinetics for ternary mixture of dissimilar particulate solids [Text] / V. Mizonov, I. Balagurov, H. Berthiaux, C. Gatumel // *Particuology*. – 2017. – Vol. 31, Issue 80–86. doi: 10.1016/j.partic.2016.05.006
8. Manley, D. Mixing and premixes in biscuit manufacture [Text] / D. Manley, H. Clark // *Manley's Technology of Biscuits, Crackers and Cookies*. – 2011. – P. 410–426. doi: 10.1533/9780857093646.4.410
9. Regner, M. Effects of geometry and flow rate on secondary flow and the mixing process in static mixers – a numerical study [Text] / M. Regner, K. Östergren, C. Trägårdh // *Chemical Engineering Science*. – 2006. – Vol. 61, Issue 18. – P. 6133–6141. doi: 10.1016/j.ces.2006.05.044
10. Kippers, N. Vibration of Standard Pitched Blade Impellers in Baffled Mixing Vessels. Vol. 4 [Text] / N. Kippers, G. Holloway // *Fluid-Structure Interaction*. – 2009. – P. 379–387. doi: 10.1115/pvp2009-77718
11. Sheliang, W. Effect of vibration mixing on the performance of recycled concrete [Text] / W. Sheliang, Z. Shimin, Z. Mingming, L. Wei // *Applied Engineering, Materials and Mechanics*. – 2016. – P. 119–127. doi: 10.1142/9789813146587\_0019
12. Osorio, J. G. Continuous Powder Mixing [Text] / J. G. Osorio, A. U. Vanarase, R. J. Romañach, F. J. Muzzio // *Pharmaceutical Blending and Mixing*. – 2015. – P. 101–127. doi: 10.1002/9781118682692.ch6
13. Vance, J. Fundamentals of Machine Vibration and Classical Solutions [Text] / J. Vance, F. Zeidan, B. Murphy // *Machinery Vibration and Rotordynamics*. – 2010. – P. 1–34. doi: 10.1002/9780470903704.ch1
14. Паламарчук, І. П. Визначення амплітудно-частотних та енергетичних параметрів вібраційної сушарки для сушіння насіння гарбуза [Текст] / І. П. Паламарчук, О. В. Цуркан, В. П. Янович, О. О. Герасимов, Б. М. Пентюк, О. В. Жегалюк // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2012. – № 3. – С. 121–125.
15. Калетнік, Г. М. Дослідження експлуатаційних характеристик вібровідцентрового змішувача для приготування преміксів [Текст] / Г. М. Калетнік, В. П. Янович // *Сільське господарство та лісівництво*. – 2017. – № 5. – С. 6–16.
16. Паламарчук, І. П. Розробка вібровідцентрового змішувача для виробництва сипких субстанцій [Текст] / І. П. Паламарчук, В. П. Янович, Ю. О. Михальова // *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. – 2017. – № 1 (96). – С. 104–107.