

УДК 631.361

С. М. Герук, доц., канд. техн. наук

Житомирський агротехнічний коледж, м. Житомир, Україна

А. П. Довбиш, асп.

Національний науковий центр „Інститут механізації та електрифікації сільського господарства”, с. м. т. Глеваха, Україна, E-mail: andreidovbysh@mail.ru

Вплив збурень коливань вібросепаратора на динаміку зернової суміші

Досліджено амплітуду коливань зернової маси при проходженні резонансу за різних значень різниці початкових фаз власних та вимушених коливань. Виведено диференціальні рівняння, які описують коливання зернової суміші у зоні резонансу. Встановлено, що зростання початкового значення різниці фаз власних та вимушених коливань спричиняє зменшення амплітуди переходу через резонанс, так зростання величини вказаної величини на 0,2 радіани спричиняє зменшення амплітуди переходу через резонанс до 26%.

математична модель, зернова суміш, сепаратор, резонанс

С. М. Герук, доц., канд. техн. наук

Житомирський агротехнічний коледж, г. Житомир, Україна

А. П. Довбиш, асп.

Національний науковий центр „Інститут механізації та електрифікації сільського господарства”, п. г. т. Глеваха, Україна

Влияние возмущений колебаний вибросепаратора на динамику зерновой смеси

Исследованы амплитуду колебаний зерновой массы при прохождении резонанса при различных значениях разности начальных фаз собственных и вынужденных колебаний. Выведены дифференциальные уравнения, описывающие колебания зерновой смеси в зоне резонанса. Установлено, что рост начального значения разности фаз собственных и вынужденных колебаний приводит к уменьшению амплитуды перехода через резонанс, так рост величины указанной величины на 0,2 радианы приводит к уменьшению амплитуды перехода через резонанс до 26%.

математическая модель, зерновая смесь, сепаратор, резонанс

Постановка завдання. Технологічні процеси підготовки зерна різних сільськогосподарських культур для переробки, зберігання чи реалізації включають в себе низку послідовних операцій, автоматизація яких значною мірою знижує собівартість кінцевого продукту. Методи сепарації та адгезії зерна (передпосівне оброблення насінневого матеріалу з метою використання новітніх засобів біологічного збагачення ґрунту), а відтак відповідні машини вказаних технологічних процесів, в останні десятиліття отримали широке застосування у сільському господарстві. Їх впровадження сприяє інтенсифікації процесів якісної підготовки зерна чи посівного матеріалу, дозволяє позбутись багатьох трудомістких операцій. Це зумовлено з одного боку відносно конструктивною простотою вказаних машин, а з іншого – високою продуктивністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичним дослідженням повітряної сепарації зернових сумішей присвячена велика кількість робіт [1,2,3]. Найбільш ґрунтовні результати досліджень з використанням математичної моделі руху матеріальної точки у турбулентному повітряному потоці отримані П. М. Заїкою [4].

© С. М. Герук, А. П. Довбиш, 2016

Обчислення характеристик руху, що виконані в цих роботах, не враховують показники власних коливань зернової суміші, а значить процес її сепарації в певній мірі залежать від відносної швидкості вздовж сита (зменшується до 15% за швидкості відносного руху 1м/с.). Незважаючи на вище наведене, обсяг аналітичних досліджень динамічних процесів в даній сфері є недостатній.

Постановка завдання. Дослідити амплітуду коливань зернової маси при проходженні резонансу за різних значень різниці початкових фаз власних та вимушених коливань та швидкостей проходження через резонанс коливань.

Виклад основного матеріалу. Відомо, що головними чинниками, які визначають процес вібро-сепарації зернової маси є їх амплітуда та частота коливань відносного руху вздовж сита. В той же час, використання чисельних методів інтегрування для неї не дає відповіді на основні практичні питання – залежність частоти коливань зернової суміші від амплітуди, параметрів зовнішнього збурення, основних характеристик зернової суміші та інше.

Визначальні показники власних коливань зернової суміші, а значить процес її сепарації в певній мірі залежать від відносної швидкості вздовж сита (зменшується до 15% за швидкості відносного руху 1м/с.). У випадку дії збудника горизонтальних коливань на вібромашину, інтенсивність процесу сепарації значною мірою залежить від співвідношення між частотами власних коливань зернової суміші та зовнішнього збурення.

Динамічний процес сепарації залежить від вигляду взаємодії сипкого середовища із стінками контейнера. Їх будемо моделювати, відповідно до прийнятої фізичної моделі, крайовими умовами “балочного типу” (із шарнірним закріпленням кінців).

Наведене дозволяє диференціальне рівняння (1) подати у вигляді

$$\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} - \alpha^2 \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \left(\frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \right)' = \mu g \left(\tau, \frac{\partial w(x,t)}{\partial x}, \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} \right) + \frac{H\omega^2}{\rho} \cos(\omega t + \psi), \quad (1)$$

де $\alpha^2 = \frac{EA}{\rho}(v+1)$, $\tau = \mu t$ - “повільний час”,

$$\mu \bar{g} \left(\tau, \frac{\partial w(x,t)}{\partial x}, \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} \right) = \mu g \left(\tau, \frac{\partial w(x,t)}{\partial x}, \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} \right) - \left(2V \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x \partial t} + V^2 \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \frac{dV}{dt} + \frac{\beta \partial w(x,t)}{\rho \partial t} \right).$$

Не дивлячись на те, що обмеження досліджуваного об'єкту в цілому є незначними і вони обґрунтовані для низки вібраційних машин із горизонтальним збудженням коливань, вони одночасно дозволяють побудувати наближений аналітичний розв'язок рівняння (1) за крайових умов (2), тобто описати аналітично динамічний процес відносних коливань зернової суміші вздовж сита під час процесу вібро-сепарації

Наведене дозволяє записати крайові умови для рівняння (1) у вигляді

$$w(x,t)|_{x=0} = w(x,t)|_{x=l} = 0. \quad (2)$$

У зв'язку із тим, що у вказаному випадку математична модель динаміки зернової суміші є неавтономною (права частина рівняння (1) є періодичною за фазою зовнішнього періодичного збурення), для неї треба розглядати принципово два різні випадки: нерезонансний та резонансний. Що стосується першого випадку (нерезонансного), то як показано у [5], мале за величиною періодичне збурення не значною мірою впливає на визначальні показники коливань системи.

Якщо прийняти до уваги обмеження щодо величин швидкості руху зернової

суміші вздовж сита та внутрішньої сили тертя у її моделі динамічного процесу, то можна стверджувати, що основні параметри коливань в процесі сепарації за один період змінюються на незначну величину. Це дозволяє для диференціальних рівнянь використати апарат усереднення [5,6] за змінною ψ .

Таким чином,

$$\frac{da}{dt} = \frac{\mu}{2\Gamma\Omega(a)} \int_0^{2\pi} \int_0^l sa(1, \nu+1, \psi_k) X(x) \left[\hat{f}_1(a, x, \psi) + \frac{2\beta a \Omega(a)}{(3\nu+4)\rho} X(x) \right] dx d\psi_k, \quad (3)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \Omega(a) + \frac{(\nu+2)}{4a\Gamma\Omega(a)} \int_0^{2\pi} \int_0^l ca(\nu+1, 1, \psi) X(x) \left[\hat{f}_1(a, x, \psi_k) - V^2 \left(\frac{\Pi_x}{l} \right)^2 a X(x) \right] dx d\psi.$$

Це дозволяє стверджувати, що амплітуда та частота зернової суміші за умови відсутності резонансу описуються з точністю до величин порядку μ^2 диференціальними рівняннями (3).

Більш складним у дослідженні, одночасно важливішим із практичної сторони, є резонансний випадок. У зв'язку із цим, зазначимо що:

- а) власна частота зернової суміші залежить від амплітуди коливань;
- б) період за фазою власних коливань (ψ) рівний періоду за вказаним аргументом відповідних $A_{\text{теб}}$ – функцій, тобто 2Π ;
- в) період зовнішнього збурення за фазою зовнішнього збурення $\omega t + \phi$ рівний 2π ; за умову резонансу будемо приймати рівність періодів за часом власних та вимушених коливань, тобто $\frac{\Pi}{\Omega(a)} = \frac{\pi}{\omega}$.

Таким чином, резонансні коливання зернової суміші будуть мати місце при виконанні умови $\omega \approx \frac{\pi}{\Pi} \Omega(a)$. Останнє показує, що для кожної амплітуди власних

коливань зернової суміші вздовж сита $\Omega(a) = \alpha a^{\frac{\nu}{2}} \left(\frac{\Pi_x}{l} \right)^{\frac{\nu+2}{2}}$ існує своя резонансна частота збурення коливань вібраційного сепаратора

$$\omega = \frac{\pi\alpha}{\Pi} \left(\frac{\Pi_x}{l} \right)^{\frac{\nu+2}{2}} a^{\frac{\nu}{2}} \quad (4)$$

і, навпаки, – для кожної частоти збурень вібраційної машини існує таке значення амплітуди коливань (амплітуди резонансу) зернової маси a_p вздовж сита сепаратора, при наближенні якої мають місце резонансні коливання

$$a_p = \left\{ \left(\frac{l}{\Pi_x} \right)^{\frac{\nu+2}{2}} \frac{\Pi\omega}{\pi\alpha} \right\}^{\frac{2}{\nu}}. \quad (5)$$

На рис. 1. представлено залежність частоти зовнішнього збурення від амплітуди a коливань зернової маси та параметру нелінійності ν , (при $l=100\text{см}$, $\alpha=75$), а на рис. 2. – амплітуди резонансу від частоти зовнішнього збурення та параметру нелінійності ν

Таким чином, при наближенні частоти зовнішнього збурення до значення, яке визначається залежністю (4), мають місце резонансні коливання сипкого середовища. З іншого боку, явище резонансу у квазілінійних чи нелінійних системах суттєво залежить від різниці фаз власних та вимушених коливань.

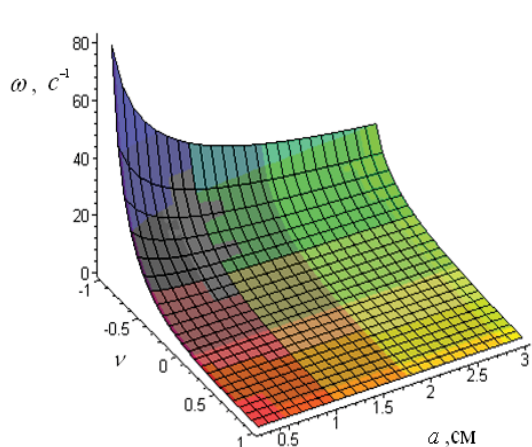


Рисунок 1 – Залежність частоти зовнішнього збурення від амплітуди a коливань зернової маси та параметру нелінійності ν

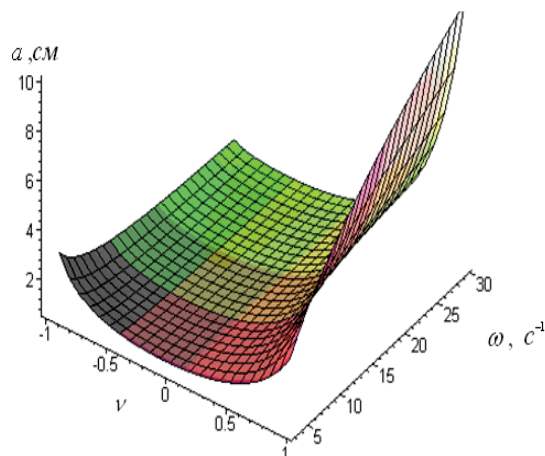


Рисунок 2 – Залежність амплітуди резонансу від частоти зовнішнього збурення та параметру нелінійності ν

Тому формально вводячи параметр $\vartheta = \frac{\pi}{\Pi} \psi - \theta \Rightarrow \theta = \frac{\pi}{\Pi} \psi + \vartheta, \psi = \frac{\Pi}{\pi} (\theta - \vartheta)$ у систему диференціальних рівнянь (3) отримуємо

$$\frac{da}{dt} = \frac{sa(1, \nu + 1, \psi) \left[\mu \hat{g}(a, \psi) + \frac{H\omega^2}{\rho} \cos\left(\frac{\pi}{\Pi} \psi + \vartheta\right) \right]}{Pa\Omega(a)}, \quad (6)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\pi}{\Pi} \Omega(a) - \omega - \frac{(\nu + 2)ca(\nu + 1, 1, \psi) \left[\mu \hat{g}(a, \psi) + \frac{\bar{H}\omega^2}{\rho} \cos\left(\frac{\pi}{\Pi} \psi + \vartheta\right) \right]}{2Pa\Omega(a)},$$

$$\text{де } \hat{g}(a, \psi) = \mu \hat{f}_1(a, \psi) - \frac{2\beta a \Omega(a)}{(3\nu + 4)\rho} sa(1, \nu + 1, \psi) - \frac{\nu + 2}{3\nu + 4} \left(\frac{k\Pi_x}{l} \right)^2 V^2 aca(\nu + 1, 1, \psi).$$

Праві частини диференціальних рівнянь (6) є 2Π - періодичними за фазою власних коливань ψ , а отже їх можна усереднити за цією змінною. Наведене дозволяє систему диференціальних рівнянь (6), які описують коливання зернової суміші у зоні резонансу, представити у вигляді

$$\frac{da}{dt} = -\frac{2\beta(\nu + 2)^2 a}{(3\nu + 4)\Pi\rho} \frac{\sqrt{\pi}\Gamma\left(\frac{3}{\nu + 2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2} + \frac{3}{\nu + 2}\right)} - \frac{\hat{H}\omega^2}{2Pa\rho\Omega(a)} \sin \vartheta; \quad (7)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \alpha a^{\frac{\nu}{2}} \frac{\Pi}{\pi} \left(\frac{\Pi_x}{l} \right)^{\frac{\nu+2}{2}} - \omega - \frac{(\nu + 2)^2 a^{\frac{-\nu}{2}} V^2}{(3\nu + 4)\Pi_r P\alpha \left(\frac{k\Pi_x}{l} \right)^{\frac{\nu-2}{2}} \Gamma\left(\frac{1}{2} + \frac{3}{\nu + 2}\right)} + \frac{\bar{H}\omega^2}{2Pa\rho\Omega(a)} \cos \vartheta, \quad (8)$$

$$\text{де } \hat{H} = \frac{1}{2\Pi} \int_0^{2\Pi} sa(1, \nu + 1, \psi) \sin\left(\frac{\pi}{\Pi} \psi\right) d\psi, \quad \check{H} = \frac{1}{2\Pi} \int_0^{2\Pi} ca(\nu + 1, 1, \psi) \cos\left(\frac{\pi}{\Pi} \psi\right) d\psi.$$

Приймаючи до уваги, що остання система рівнянь описує коливання зернової маси у резонансній зоні, тобто при наближенні параметру a до a_p , різницю

$$\alpha a^{\frac{\nu}{2}} \frac{\Pi}{\pi} \left(\frac{\Pi_x}{l}\right)^{\frac{\nu+2}{2}} - \omega \text{ у другому рівнянні можна замінити більш простим виразом, а саме}$$

$$\alpha \frac{\Pi}{\pi} \left(\frac{\Pi_x}{l}\right)^{\frac{\nu+2}{2}} a_p^{\frac{\nu-2}{2}} (a - a_p).$$

Для деяких частот зовнішнього збурення та фізико-механічних характеристик зернової суміші значення амплітуди резонансу та амплітуди під час переходу через резонанс представлено у табл.1.

Таблиця 1 – Залежність амплітуди коливань під час переходу через резонанс від різних значень зовнішніх та внутрішніх параметрів

Параметри					
l , см	α	ν	ω , c^{-1}	a_p , см	a , см
150	100	-2/3	10	2,754	12,513
150	100	-2/3	12	1,594	16.213
150	100	-2/3	15	0,861	25.187
150	150	-2/3	10	9,295	16,982
150	150	-2/3	12	5,379	15.198
150	150	-2/3	15	2,754	18.214
100	150	-2/3	10	20,915	26,137
100	150	-2/3	12	12,104	21.187
100	150	-2/3	15	6,197	20.143
100	100	-2/3	10	6,108	14,924
100	100	-2/3	12	3,586	15.132
100	100	-2/3	15	1,836	20.513
100	150	-2/5	10	3,580	11,732
100	150	-2/5	12	1,439	12,517
100	150	-2/5	15	0,471	17,784
100	150	-2/7	10	0,743	8,342
100	150	-2/7	12	0,207	11, 156
100	150	-2/7	15	0, 043	9,897

Крім цього, амплітуда переходу через резонанс залежить більшою мірою як для квазілінійних систем [7] від початкового значення різниці фаз власних та вимушених коливань та швидкості переходу через резонанс. Результати, які стосуються чисельного симулювання рівнянь у стандартному вигляді (7,8) за різних значень початкових фаз власних та вимушених коливань подані у табл. 2, а для різних швидкостей переходу через резонанс у табл. 3.

Таблиця 2 – Значення амплітуди коливань зернової маси під час переходу через резонанс за різних значень різниці початкових фаз власних та вимушених коливань при $\nu = -2/7$

Параметри					
l , см	α	ω , c^{-1}	a_p , см	$\vartheta_{ t=0}$, рад.	a , см
100	150	10	0,743	0	8,342
100	150	12	0,207	0	7,156
100	150	15	0,043	0	9,897
100	150	10	0,743	0,2	6,154
100	150	12	0,207	0,2	10,042
100	150	15	0,043	0,2	16,943
100	150	10	0,743	0,4	5,214
100	150	12	0,207	0,4	8,256
100	150	15	0,043	0,4	14,013
100	150	10	0,743	0,6	5,011
100	150	12	0,207	0,6	6,123
100	150	15	0,043	0,6	11,087
100	150	10	0,743	1,0	2,413
100	150	12	0,207	1,0	2,621
100	150	15	0,043	1,0	5,312

Таблиця 3 – Значення амплітуди коливань зернової маси під час переходу через резонанс за різних швидкостей переходу через резонанс коливань при $\nu = -2/7$

параметри						
l , см	α	ω , c^{-1}	$\vartheta_{ t=0}$, рад.	ν	Шв. переходу	a , см
150	100	10	0	$-2/7$	3t	12,347
150	100	12	0	$-2/7$	3t	18,142
150	100	15	0	$-2/7$	3t	20,017
150	100	10	0	$-2/7$	12t	6,142

Продовження таблиці 3

150	100	12	0	$-2/7$	12t	8,173
150	100	15	0	$-2/7$	12t	13,125
150	100	10	0,6	$-2/7$	12t	3,845
150	100	12	0,6	$-2/7$	12t	4,464
150	100	15	0,6	$-2/7$	12t	7,422
150	100	10	0,6	$-2/5$	12t	6,213
150	100	12	0,6	$-2/5$	12t	4,827
150	100	15	0,6	$-2/5$	12t	6,224
150	100	10	0,3	$-2/5$	12t	7,531
150	100	12	0,3	$-2/5$	12t	6,423
150	100	15	0,3	$-2/5$	12t	8,731
100	150	10	0,3	$-2/3$	12t	7,413
100	150	12	0,3	$-2/3$	12t	8,326
100	150	15	0,3	$-2/3$	12t	13,147
100	150	10	0,3	$-2/3$	6t	10,213
100	150	12	0,3	$-2/3$	6t	12,641
100	150	15	0,3	$-2/3$	6t	19,016
100	150	10	1	$-2/3$	6t	4,831
100	150	12	1	$-2/3$	6t	4,762
100	150	15	1	$-2/3$	6t	5,681

Висновки. Із наведеного вище випливає, що резонансні коливання зернової суміші в процесі вібраційної обробки мають місце за певного співвідношення між частотою збурення коливань сепаратора, амплітуди коливань її вздовж сита та основних фізико-механічних параметрів зернової суміші. Крім цього для значень параметру $-1 < \nu < 0$:

- більшим значенням частоти збурення горизонтальних коливань вібраційного сепаратора відповідає менше значення амплітуди, за якої мають місце резонансні коливання та одночасно амплітуда коливань зернової суміші під час переходу через резонанс є більшою;

- більшим значенням параметру ν відповідає менше значення амплітуди за якої має місце резонанс, а також менше значення амплітуди переходу через резонанс зернової маси;

- зростання початкового значення різниці фаз власних та вимушених коливань спричиняє зменшення амплітуди переходу через резонанс. Так зростання вказаної величини на 0,2 рад. спричиняє зменшення амплітуди переходу через резонанс до 26%. Що стосується швидкості переходу через резонанс, то для більш швидкого

зменшення різниці частот власних та вимушених коливань, амплітуда переходу через резонанс приймає менше значення.

Список літератури

1. Анпилогов В. А. Исследование динамики частиц при объемной вибрационной обработке [Текст] / В. А. Анпилогов // Вопросы совершенствования технологических процессов машиностроения. – Ижевск, 1971. – С. 24 – 31.
2. Бабичев А. П. Проблемы вибрационной технологии [Текст] / А. П. Бабичев // Винница Всеукраинский научн. техн. журнал Вибрации в технике и технологиях. – 1994. – №1. – С. 1 – 3.
3. Стоцько З. А. Вплив оброблених деталей на динаміку завантаження контейнера вібромашини [Текст] / Стоцько З. А., Сокіл Б. І., Топільницький В. Г., Пилипишин М. В. // Укр. зб. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2003. – Вип. 37.– С.39–43.
4. Заика П. М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел [Текст] / П. М. Заика. – К.: УСХА, 1998. – 625 с.
5. Волосов В. М. Метод осреднения в теории нелинейных колебательных систем [Текст] / Волосов Владимир Маркович, Моргунов Борис Иванович. – М.: МГУ, 1971. – 507 с.
6. Митропольский Ю. А. Асимптотические решения уравнений в частных производных [Текст] / Ю. А. Митропольский, Б. И. Моисеенков. – К.: Вища школа, 1976. – 216 с.
7. Боголюбов Н. Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний [Текст] / Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский. – М.: Наука. – 1974. – 504 с.

Stanislav Geruk, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Zhytomyr Agricultural College, Zhytomyr, Ukraine

Andriy Dovbysh, post-graduate

National Scientific Centre "Institute for Agricultural Engineering and Electrification", Glevakha, Ukraine

The influence of of disturbances on dynamics of vibrations vibration separator cereal mixture

The grain mass oscillations amplitude when passing the resonance is studied at different values of the initial and forced oscillations difference. The differential equations that describe the oscillations of the grain mixture in resonance zone are deduced.

The graphic dependences of external excitation frequency on the grain mass oscillations amplitude and nonlinearity parameter are developed. The graphic dependences of the resonance amplitude on the external excitation frequency and nonlinearity parameter are developed as well.

It was found that the growth of the initial value of the phase difference of own and forced oscillations caused a reduction in the amplitude of passing through the resonance. Consequently, the growth of the given value by 0.2 rad caused a reduction in the amplitude of passing through the resonance to 26%.

mathematical model, grain mixture, separator resonance

Одержано 04.11.16