

**МАШИНИ ТА РОБОЧІ ПРОЦЕСИ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА**

УДК 631.362.3

**ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ВІБРАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ  
В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ****Петро Коруняк<sup>1</sup>, к. т. н., Олексій Швець<sup>1</sup>, к. т. н., Ірина Ніщенко<sup>2</sup>, к. ф.-м. н.**

<sup>1</sup>Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна  
e-mail: petrokorunyak@gmail.com; shvets2882@gmail.com

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
м. Київ, проспект Перемоги, 37,  
e-mail: irynan@gmail.com

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.009>

**Коруняк П., Швець О., Ніщенко І. Функціонування технологічного вібраційного обладнання в електростатичному полі**

Підвищення ефективності виробництва, збільшення випуску продукції і поліпшення її якості за одночасного зниження трудових затрат, удосконалення форм організації та управління виробництвом є основою розвитку машинобудування. Це забезпечується вдосконаленням існуючих і впровадженням нових видів устаткування, технологічних процесів і засобів їх механізації та автоматизації, створенням нових технологічних комплексів, де всі ці питання взаємопов'язані і комплексно вирішуються.

Транспортувальні засоби забезпечують безперервність, ритм роботи всіх структурних одиниць потокового виробництва – від складських операцій, подачі технологічного об'єкта, робочого процесу оброблення до виходу готової продукції. Найбільш трудомісткими з погляду автоматизації вважаються ті технологічні операції, які пов'язані з необхідним орієнтуванням виробів.

Найбільш розповсюдженим і ефективним засобом орієнтування технологічних об'єктів є вібраційні живильники з електромагнітним приводом. У цих пристроях процес орієнтування об'єкта (виробу) здійснюється під час вібраційного переміщення як на доріжці чаші, так і на будь-якій ділянці його руху до робочої позиції. Зручність управління і досконалість конструкції цього типу обладнання забезпечили йому провідне місце в автоматизованому виробництві.

Крім засобів автоматизації, вібраційна техніка набула широкого застосування в різноманітних технологічних процесах, зокрема під час сепарування. Орієнтування компонентів суміші відносно отворів решета значно підвищує ефективність просіювання. Одним зі способів реалізації такої задачі є поєднання вібраційних процесів з електричними властивостями компонентів суміші в електричному полі високої напруги. Безвідливний режим вібраційного транспортування робочої суміші і необхідна напруженість електричного поля поліпшують умови робочого процесу вібраційного сепарування.

За результатами досліджень встановлено, що забезпеченням відповідних параметрів роботи технологічного обладнання можна значно інтенсифікувати процес просіювання компонентів суміші через отвори решета і тим самим зменшити його робочу площу.

Поєднання розглянутих ефектів можна використати не лише під час міжопераційного транспортування виробів, а й у роботі пристроїв для їх групового касетування і вкладання, магазинів-накопичувачів для автоматичного орієнтування та позиціонування для захоплювальних пристроїв маніпуляторів і промислових роботів, автоматичних пристроїв завантаження технологічного обладнання. Важливим є те, що зазначені пристрої набули широкого застосування у виробничих процесах, пов'язаних з виробами, які мають незначні масово-геометричні параметри.

**Ключові слова:** автоматизація, вібрація, транспортування, коливання, орієнтування, насіння, сепарування, електричне поле.

**Koruniak P., Shvets O., Nishchenko I. Operation of the technological equipment of vibration type in an electrostatic field**

Increase of production efficiency and production output, improvement of its quality while reducing labor costs, upgrade of the forms of organization and production management are the basic elements of mechanical engineering development. This is ensured by the improvement of the existing and introduction of new types of equipment, technological processes and means of their mechanization and automation, creation of new technological complexes where all these issues are interconnected and comprehensively solved.

Means of transportation ensure the continuity and rhythm of work of all structural units of flow production, starting from warehouse operations, supply of a technological object, and the work process of processing to the output of finished

products. In terms of automation, the most time-consuming technological operations are those that are associated with the necessary orientation of products.

The most common and effective means of technological object orienting are vibration feeders with an electromagnetic drive. In these devices, the process of orientation of the object (product) is carried out with vibrational movement both on the path of the bowl and on any part of its movement to the working position. The ease of operation and the perfect design of this type of equipment have provided it with a leading place in automated production.

In addition to automation, vibration technology has been widely used in various technological processes, in particular during separation. The orientation of the mixture components referring to the sieve openings significantly increases the screening efficiency. One of the ways to implement this task is to combine vibration processes with the electrical properties of the mixture components in a high-voltage electric field. Continuous mode of vibration transportation of the working mixture and the required electric field strength improve the conditions for the working process of vibration separation.

According to the results of the research, it is found that ensuring the appropriate operating parameters of the technological equipment can significantly intensify the process of sifting the mixture components through the sieve openings and thereby reduce its working area.

Combining the considered effects can be applied not only during the interoperational transportation of products but also in the operation of devices for their group cassette and stacking, storage magazines for automatic orientation and positioning for gripping devices of manipulators and industrial robots, and automatic loading devices for technological equipment. These devices must be widely used in production processes associated with products with small mass-geometric parameters.

**Key words:** automation, vibration, transportation, oscillation, orientation, seeds, separation, electric field.

**Постановка проблеми.** Автоматизація виробничих процесів – це комплекс заходів із розробки нових прогресивних технологій та проектування на їх основі високопродуктивного технологічного обладнання. Завдяки йому в певному алгоритмі здійснюються робочі та допоміжні операції без участі людини. Це дозволяє не лише зменшити допоміжний час, а й підвищити коефіцієнт використання і продуктивність обладнання, покращити умови праці, зменшити собівартість продукції.

З усієї сукупності технологічних операцій найбільш трудомісткими з погляду автоматизації вважаються ті, які пов'язані з необхідним орієнтуванням виробів під час оброблення, складання, контролю, пакування тощо. У загальному випадку технологічний процес можна представити як взаємодію технологічного об'єкта (виробів) із знаряддями праці (інструментом), що знаходяться у довільному положенні виробничого простору. Тому важливою складовою як комплексної механізації, так і автоматизації виробництва в цілому є процеси просторового маніпулювання такими об'єктами [5; 6].

Під час проектування засобів автоматизації на вибір способів і конструктивних рішень великий вплив мають конфігурація, розміри, маса та інші властивості цих об'єктів (заготовок деталей, виробів, частинок середовища), які піддаються тим чи іншим технологічним операціям [6; 16].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На виробництві за умови перебування технологічного об'єкта в ємності навалом (насіпом) для забезпечення автоматичної подачі часто виникає необхідність його урухомлення та надання йому напрямленого переміщення. Існує широкий спектр способів і засобів автоматичного маніпулювання виробами. З погляду силової

взаємодії під час переміщення, орієнтування, суміщення і фіксування вони поділяються на механічні, вібраційні, пневматичні, магнітні та електричні. Такі пристрої оснащуються власним приводом або ж приводяться в дію від обслуговуваного обладнання.

Деталі, заготовки, вироби (або довільні компоненти-складові) повинні певним чином транспортуватися, відбиратися (вийматися) і відповідно орієнтуватися та позиціонуватися для виконання наступних технологічних операцій. Як правило, їх подачу можна здійснювати за допомогою бункерних завантажувальних пристроїв, конструкції яких можуть містити бункер (ємність), механізми захоплення та орієнтування, накопичувач, відсікач, живильник, привід тощо. Характерним для їх роботи є те, що матеріал перебуває в інтенсивному і постійному переміщенні (зрушується, урухомлюється).

На думку багатьох вчених та інженерів, універсальними для подачі об'єктів оброблення є вібраційні бункерні живильники (ВБЖ). Відомий цілий ряд конструкцій, серед яких найефективнішими і найрозповсюдженішими є віброживильники з електромагнітним віброприводом. Визначальною особливістю цих пристроїв є те, що переміщення виробів у них здійснюється не в результаті сумісного руху з робочим органом, а внаслідок вібрації останнього. Ця обставина зумовлює низку важливих технологічних та експлуатаційних переваг вібраційного способу транспортування. Під дією вібрації вироби чи компоненти суміші одержують напрямлене переміщення поверхнею робочого органа (прямолінійного лотка) до наступної позиції технологічного процесу [5–7; 14].

Зручне поєднання зі системою керування автоматизованого обладнання, достатньо просте регулювання швидкості, програмування її зміни та напрями руху, безінерційність механічної

системи (тобто можливість практично миттєвої зупинки і початку руху), відсутність поверхонь тертя, простота обслуговування та експлуатації, безпека експлуатації, висока енергоощадність, можливість завантаження і розвантаження в довільній точці транспортування – це далеко не повний перелік важливих технологічних і експлуатаційних переваг використання вібраційних засобів переміщення.

У віброживильниках процес орієнтування об'єкта (виробу) здійснюється під час вібропереміщення як на доріжці чаші, так і на будь-якій ділянці його руху до робочої позиції. Важливих технологічних і експлуатаційних переваг використання вібраційних засобів переміщення.

Оскільки абсолютно тверде вільне тіло має шість степенів вільності, то під час цього процесу воно втрачає п'ять степенів вільності і залишається лише один. Як правило, виріб може містити в собі як одну, так і декілька ознак орієнтування, які залежать від зовнішньої та внутрішньої форми (конфігурації), ознак симетричності, положення центру ваги, фізичних властивостей виробу, властивостей транспортувальної поверхні. Враховуючи всі ці ознаки і поетапно їх реалізувавши, об'єкт набуває необхідного положення.

Вібраційна техніка знайшла своє місце в різних галузях автоматизованого виробництва для виконання основних та допоміжних операцій у різноманітних технологічних процесах. Її використовують не лише як лінійний транспорт, а й як пристрої для автоматичного завантаження технологічного обладнання, групового касетування і вкладання виробів, магазинів накопичувачів тощо. Важливо зауважити, що зазначені пристрої набули широкого застосування у виробничих процесах, пов'язаних з виробами з незначними масово-геометричними параметрами, і мають нечітке орієнтування.

На практиці найчастіше використовуються прямолінійні гармонійні коливання, як такі, що відносно просто з технічного погляду реалізуються. Для визначення й опису режиму руху виробу віброувальною поверхнею користуються узагальненим безрозмірним параметром перевантаження  $\xi$  [5–7; 14], який визначається відношенням нормальної складової пришвидшення до нормальної складової пришвидшення земного тяжіння:

$$\xi = \frac{A_n \omega^2}{g \cos \alpha},$$

де  $A_n$  – амплітуда коливань у напрямі, перпендикулярному до площини робочого органа;  
 $\omega$  – кутова частота коливань;  
 $g$  – пришвидшення земного тяжіння;  
 $\alpha$  – кут нахилу транспортувальної поверхні.

Параметр перевантаження (коефіцієнт режиму руху)  $\xi$  характеризує «відривність»,

швидкість руху виробу по поверхні лотка. Якщо  $\xi \leq 1$ , він рухається без відриву від поверхні з проковзуванням, а за умови  $1 \leq \xi \leq 1,16$  – відбувається плавний рух без помітного відриву, тоді як при  $\xi = 1,16 \dots 1,7$  має місце відривний режим руху (з підкиданням, стрибкоподібно). У процесі проєктування ВБЖ значення параметра перевантаження вибирають з умови забезпечення необхідної плавності руху деталей віброувальною поверхнею.

Режими руху з проковзуванням реномендується використовувати для переміщення тонких і нежорстких деталей, але, як показали дослідження, вони забезпечують незначні швидкості переміщення (близько 4...5 м/хв). Більші швидкості переміщення і високу продуктивність завантажувальних пристроїв можна реалізувати за умови використання режимів руху з відривом (саме у такий спосіб забезпечують максимальні значення ККД і стабільність процесу).

Крім живлення технологічного обладнання, зорієнтованими виробами вібраційні пристрої використовуються і в інших виробничих процесах, наприклад, під час сепарування суміші на перфорованих деках у повітряному середовищі [7]. У процесі проєктування і вдосконалення засобів вібраційного розділення сипкої суміші необхідно враховувати, що вібрація не лише пришвидшує робочий процес розділення, а й сприяє її переміщенню [3; 6; 7; 14]. Основним параметром для досягнення найбільшого ефекту сепарування є середня швидкість транспортування, яка, своєю чергою, залежить від частоти і амплітуди, а також і форми коливань. Важливими чинниками цього процесу є ступінь завантаження сепаратора, рівномірність подачі матеріалу до нього, оптимальна товщина його шару [4; 7; 14].

Для вібраційних сепараторів характерні декілька режимів транспортування, кожний з яких вибирається залежно від матеріалу, геометричних параметрів і форми його частинок. Так, у процесі руху частинок з підкиданням вірогідність просіювання істотно зменшується внаслідок зменшення часу контакту частинок зі ситом. Своєю чергою, для режиму просіювання без підкидання характерний надлишковий тиск шарів продукції, що збільшує сили тертя між частинками нижнього шару. Режим просіювання з підкиданням вважається ефективнішим для подовжених частинок у разі розділення за товщиною на ситах з овальними отворами.

Водночас слід зазначити, що форма частинок сипкого тіла впливає також на вибір самих коливань. З досвіду відомо, що для просіювання частинок, форма яких близька до сферичної, оптимальними є колові поступальні коливання сита в горизонтальній площині. Якщо ж форма частинок видовжена, то ефективнішими є прямолінійні коливання, які, своєю чергою,

забезпечують певне орієнтування їх відносно отворів.

Займаючись питаннями автоматизації виробничих процесів, на кафедрі машинобудування ЛНУП здійснювати в електричному полі високої напруги [9; 21–23]. Так, на прикладі технологічної операції сепарування суміші зерна продовгуватої форми (овес, пшениця, ячмінь, жито та ін.) з метою підвищення ефективності процесу розділення її на фракції над решето створювалось електростатичне поле. Враховуючи електричні властивості зерна, створювався такий його ступінь напруженості, за якого насінина, відносно її поздовжньої осі, на вібрвальній поверхні орієнтується терпендикулярно до решета.

Як показали результати експериментальних досліджень, електричне поле позитивно впливає на інтенсивність просіювання насіння різних культур крізь решето. За цих умов значно зменшується його робоча площа, а отже, покращується технічна характеристика пристрою. Слід зауважити, що дослідження проводились на лабораторному обладнанні з однокомпонентними коливаннями в заданому напрямі вібропереміщення у безвідривному режимі [1; 15; 18].

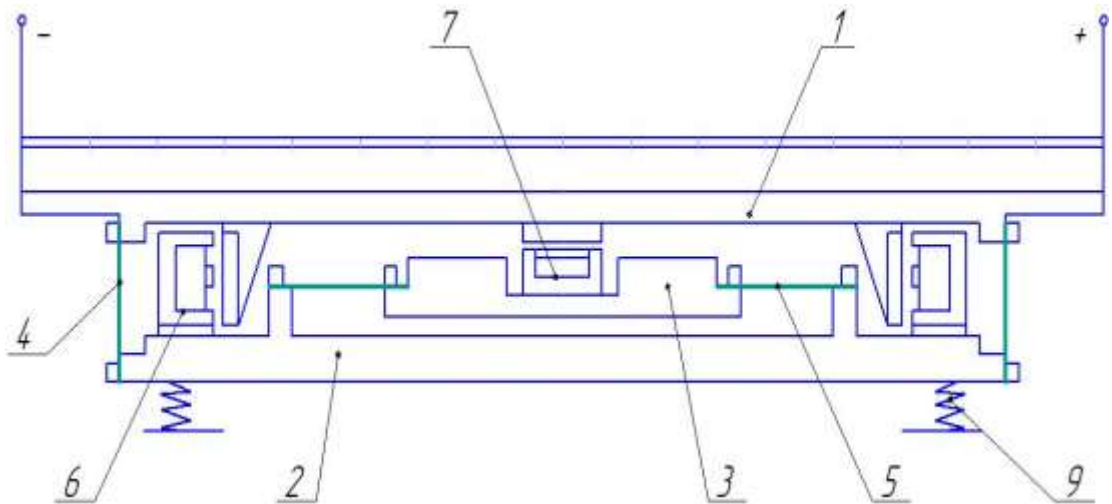
Для підвищення продуктивності і забезпечення безвідривного режиму роботи пристрою доцільним є використання незалежних (поздовжніх та нормальних) коливань, які належать до двокомпонентних. Такий вид коливань реалізується внаслідок сумування двох однокомпонентних прямолінійних коливань (повернутих у просторі одне відносно одного на деякий кут).

Серед найрозповсюдженіших двокомпонентних коливань є коливання, які характеризуються еліптичною траєкторією [6–8; 14].

**Постановка завдання.** З метою підвищення ефективності роботи віброрешітного електросепаратора необхідно дослідити його роботу за умов реалізації незалежних двокомпонентних коливань.

**Виклад основного матеріалу.** Коливальні системи вібраційних транс портувальних засобів з незалежними коливаннями та електромагнітним віброприводом будуються за тримасовою та двомасовою схемами. Незалежне збурення поздовжніх і нормальних коливань завдяки електромагнітним приводам уможливило реалізацію еліптичних траєкторій у безвідривному режимі з високим коефіцієнтом ККД, а також дає змогу здійснити дистанційне регулювання параметрів вібротранспортування.

У дослідженнях використовувався вібраційний транспортер, виконаний за тримасовою коливною системою (рис. 1). Він складається з робочого органу 1 (двоярусного решета) і реактивних елементів 2, 3, зв'язаних пружними системами 4, 5 поздовжніх і нормальних коливань, виконаними у вигляді плоских пружин. Поздовжні і нормальні до транспортувальної поверхні (решета) коливання збурюються електромагнітними віброприводами 6, 7. Із зсувом фаз між збурювальними зусиллями робочий орган буде здійснювати коливання за еліптичною траєкторією.



**Рис. 1.** Принципова схема віброрешітного електросепаратора з незалежно збурювальними коливаннями  
**Fig. 1.** Schematic diagram of a vibration separator with independently disturbing oscillations

Для дослідження роботи запропонованого пристрою поверхню його робочого органу (решето) заключимо в нерухому декартову систему координат  $Ox_0y_0z_0$  [3; 12]. Відносно неї решето здійснює коливання з частотою  $\nu = 25$  Гц та амплітудою  $A$  під кутом  $\alpha$  до горизонтальної площини (рис. 2).

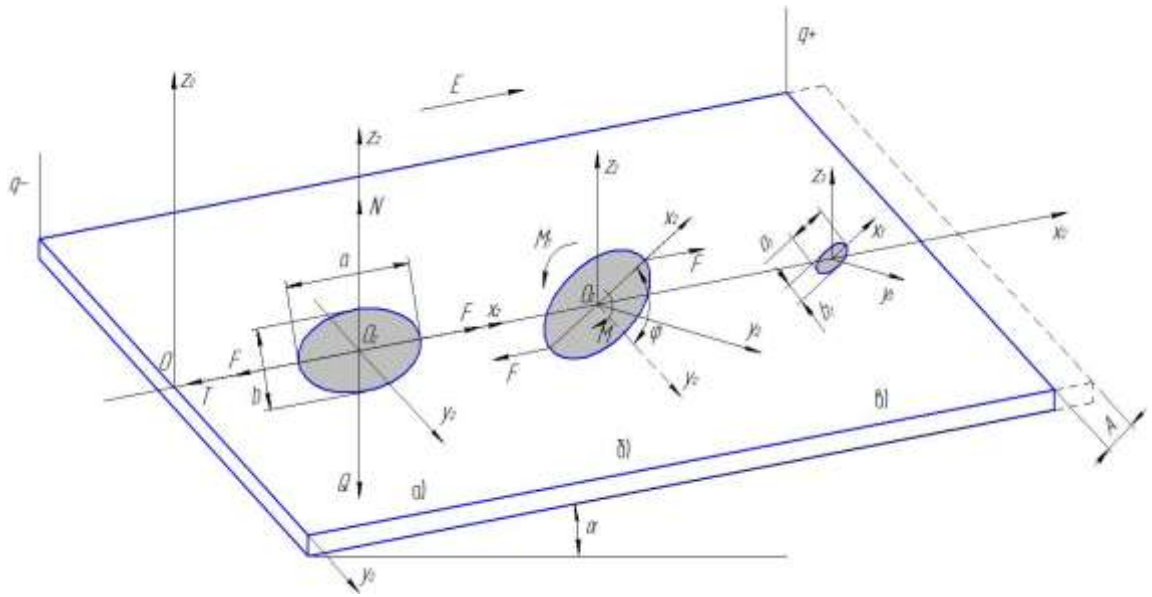


Рис. 2. Розрахункові схеми:

а – схема дії сил на насініну; б – схема виникнення обертового моменту; в – пляма контакту насініни з площиною

Fig. 2. Calculation schemes:

a – diagram of the action of forces on the seed; b – scheme of the torque generation; c – spot of the seed with the plane contact

За цих умов рівняння коливань у проєкціях на осі координат матимуть вигляд:

$$x_1(t) = A \cos \alpha \sin(\omega t); \quad z_1(t) = A \sin \alpha \sin(\omega t), \quad (1)$$

де  $\omega = 50\pi$  рад/с – кутова швидкість.

Вважаємо, що насініна масою  $m$  має форму еліпсоїда обертання, рівняння якого відносно головних центральних осей  $O_2x_2y_2z_2$  має вигляд

$$\frac{x_2^2}{a^2} + \frac{y_2^2}{b^2} + \frac{z_2^2}{b^2} = 1, \quad (2)$$

де  $a > b$  – півосі еліпсоїда обертання; вісь  $O_2z_2$  – вертикальна

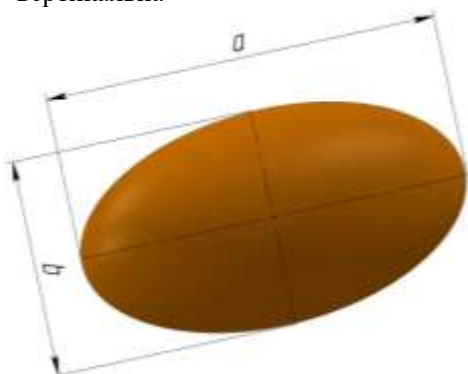


Рис. 3. Насініна у формі еліпсоїда обертання

Fig. 3. A seed in the shape of an ellipsoid of rotation

Під дією вібрації насіння переміщується відносно решета в напрямі осі  $Ox_0$ . При цьому на нього діють: сила ваги  $Q = mg$ , нормальна реакція  $N$  (напрявлена вертикально вгору) і сила тертя  $T$  (завжди спрямована протилежно до відносної

швидкості насініни). Крім того, насініна перебуває в однорідному електростатичному полі, вектор напруженості  $\vec{E}$  якого паралельний до осі  $Ox_0$  (див. рис. 2, а).

Зазвичай насіння електрично нейтральне, але під дією електростатичного поля заряди протилежних знаків величиною  $q$  і  $(-q)$  зосереджуються на протилежних кінцях по більшій півосі. Унаслідок цього на насініну діятимуть ще дві протилежно напрямлені сили  $F = Eq$ , які утворюють пару сил з моментом

$$M = 2aEq \cos \varphi, \quad (3)$$

де  $0 \leq \varphi \leq \pi/2$  – кут між осями  $O_2x_2$  і  $Oy_0$ .

Момент  $M$  намагається обернути насініну навколо осі  $O_2z_2$  (див. рис 2, б). У цій ситуації йому протидіє момент сил тертя  $M_T$ , який можна визначити на підставі теорії Герца про контактну взаємодію двох тіл (насініни і решета, див. рис 2, в). Згідно з цією теорією площинка контакту обмежена еліпсом

$$\frac{x_3^2}{a_1^2} + \frac{y_3^2}{b_1^2} = 1; \quad a_1 \geq b_1, \quad (4)$$

а розподіл тиску обчислюємо за формулою

$$p(x_3, y_3) = \frac{3N}{2\pi a_1 b_1} \sqrt{1 - \frac{x_3^2}{a_1^2} - \frac{y_3^2}{b_1^2}}. \quad (5)$$

Осі  $O_3x_3$  і  $O_3y_3$  паралельні відповідно осям  $O_2x_2$  і  $O_2y_2$ . Ексцентриситет  $e$  еліпса (4) ( $e^2 = 1 - b_1^2/a_1^2$ ) не залежить від сили  $N$  та фізичних властивостей тіл і визначається з трансцендентного рівняння

$$\left(\frac{1}{e^2} - 1\right) \left(\frac{K(e)}{E(e)} - 1\right) = \frac{b^2}{a^2 + b^2}, \quad (6)$$

де  $K(e) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \theta}}$  – повний еліптичний інтеграл першого роду;

$E(e) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-e^2 \sin^2 \theta} d\theta$  – повний еліптичний інтеграл другого роду.

Розв'язуючи рівняння (6), можна знайти значення півосей еліпса (4) за формулами

$$a_1 = \left(\frac{3NE(e)(K_1+K_2)a^2b}{2(1-e^2)(a^2+b^2)}\right)^{1/3}; \quad b_1 = a_1\sqrt{1-e^2}, \quad (7)$$

де  $K_i = \frac{1-v_i^2}{\pi E_i}$  ( $i=1,2$ );

$E_i$  і  $v_i$  – модулі Юнга і коефіцієнти Пуассона матеріалів насінини та решета відповідно.

Момент  $M_T$  можна виразити через подвійний інтеграл

$$M_T = f \iint_{\Omega} p(x_3, y_3) \sqrt{x_3^2 + y_3^2} dx_3 dy_3, \quad (8)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання;

$\Omega$  – область контакту, обмежена еліпсом (4).

Далі, підставляючи у (8) вираз (5) для тиску і здійснивши заміну змінних

$$\begin{aligned} x_3 &= a_1 \rho \cos \theta, \quad y_3 = b_1 \rho \sin \theta; \\ 0 &\leq \rho \leq 1; \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi, \end{aligned} \quad (9)$$

виконаємо інтегрування по  $\rho$ . У результаті цього одержуємо компактну формулу для обчислення моменту  $M_T$

$$M_T = \frac{3fNa_1}{8} E(e). \quad (10)$$

Диференціальне рівняння руху насінини відносно решета матиме вигляд

$$\begin{aligned} m \frac{d^2x}{dt^2} &= T - m \frac{d^2x_1}{dt^2}; \quad m \frac{d^2z}{dt^2} = N - m \frac{d^2z_1}{dt^2} - mg; \\ I_z \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= M - M_T, \end{aligned} \quad (11)$$

де  $I_z = m(a^2 + b^2)/5$  – момент інерції насінини відносно осі  $O_2z_2$ ;

$T = fN \text{sign}\left(-\frac{dx}{dt}\right)$  – сила тертя при відносному русі насінини.

Оскільки рух безвідривний, то  $z=0$ ,  $N \geq 0$ . Тоді з другого рівняння (11) можна знайти нормальну реакцію:

$$N = mg - mA \sin \alpha \omega^2 \sin(\omega t); \quad A \sin \alpha \leq \frac{g}{\omega^2}. \quad (12)$$

Враховуючи викладене, диференціальні рівняння (11) набувають вигляду:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2x}{dt^2} &= fN \text{sign}\left(-\frac{dx}{dt}\right) + mA \cos \alpha \omega^2 \sin(\omega t); \\ \frac{m(a^2+b^2)}{5} \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= 2aEq \cos \varphi - \frac{3fNa_1}{8} E(e) \end{aligned} \quad (13)$$

Ці диференціальні рівняння розв'язувались у середовищі *MATLAB* методом Рунге-Кутта четвертого порядку точності при заданих значеннях параметрів  $m$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $E$ ,  $q$ ,  $f$ ,  $A$  і  $B$ .

Для досліджень було вибрано два види насіння еліптичної форми, а саме пшениці та вівса, які мали такі характеристики:

- насіння пшениці:  $a = 3,3$  мм,  $b = 1,9$  мм,  $m = 0,04$  г,  $q = 5,2 \cdot 10^{-11}$  Кл,  $E_1 = 10^4$  МПа – модуль пружності,  $\nu_1 = 0,3$  – коефіцієнт поперечної деформації.

- насіння вівса:  $a = 8$  мм,  $b = 1,5$  мм,  $m = 0,03$  г,  $q = 6,7 \cdot 10^{-11}$  Кл,  $E_1 = 10^4$  МПа – модуль пружності,  $\nu_1 = 0,3$  – коефіцієнт поперечної деформації.

Параметри роботи сепаратора були такими:  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $f = 0,4$ ;  $\nu = 25$  Гц;  $\omega = 2\pi\nu$  рад/с;

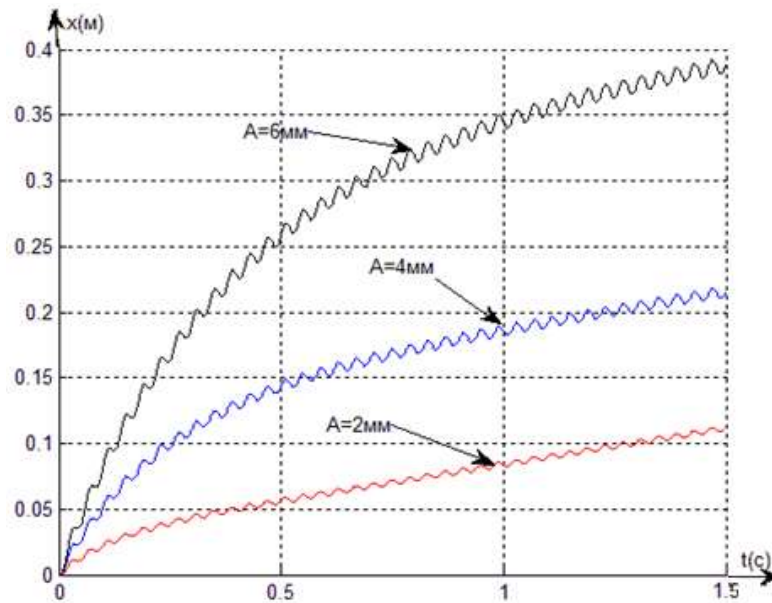
$E_2 = 2 \cdot 10^5$  МПа – модуль пружності матеріалу решета;  $\nu_2 = 0,25$ .

Результати досліджень показують, що зі збільшенням амплітуди коливань  $A$  шлях, який

проходить насінина за одиницю часу, зростає. Так, зі зростанням амплітуди від 2 до 4 мм шлях, пройдений насіниною за 1 с, зростає удвічі, а при збільшенні амплітуди до 6 мм він зростає більш як у 3,5 раза.

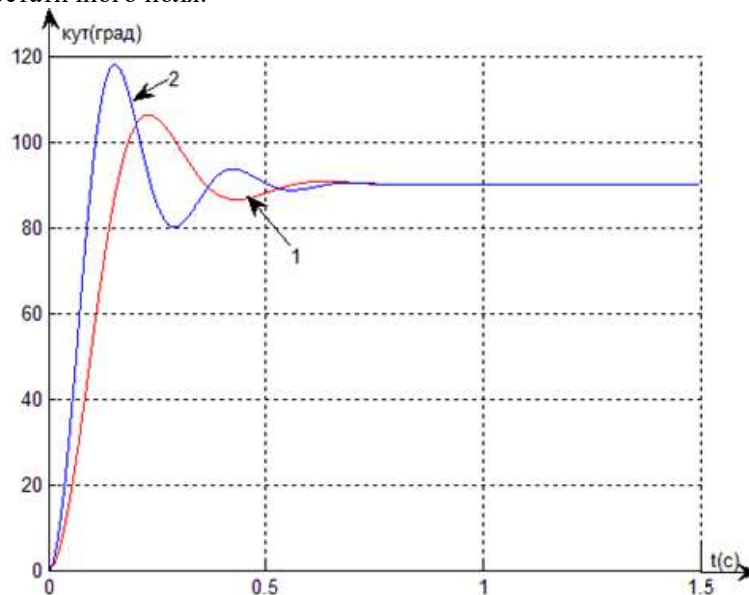
Помістивши насінину в електричне поле, під дією заряду, який накопичуватиметься на ній, створюватиметься сила  $F$ , під дією якої виникає обертовий момент  $M$ , який, своєю чергою, намагатиметься повернути насінину еліптичної форми довшою віссю  $a$  вздовж ліній дії електричного поля. За наведеними вище диференціальними рівняннями можна визначити положення насінини на коливній площині в електричному полі високої напруженості. Оскільки в нашому випадку силова дія поля спрямована в горизонтальній площині і збігається з напрямом коливань, то під час переміщення кут  $\varphi$  між осями  $O_2x_2$  і  $Oy_0$  буде змінюватися, що призводитиме до бажаного орієнтування насінини.

На рис. 4 наведено графічні залежності руху насінини вздовж решета за різних амплітуд коливань системи.



**Рис. 4.** Графік руху насіння вздовж решета при різних амплітудах горизонтальних коливань решета  
**Fig. 4.** Graph of seeds moving along the sieve at different amplitudes of the sieve horizontal oscillations

На рис. 5 і 6 наведені графіки зміни кута повороту насіння пшениці і вівса при різних значеннях напруженості електростатичного поля.



**Рис. 5.** Графік зміни кута повороту насіння пшениці при різних значеннях напруженості електростатичного поля:

1 – за напруженості  $E=2\text{ кВ/см}$ ; 2 – за напруженості  $E=4\text{ кВ/см}$

**Fig. 5.** Graph of changes in the angle of wheat seeds rotation at different values of the electrostatic field intensity:

1 – at voltage of  $E=2\text{ kV/cm}$ ; 2 – at voltage of  $E=4\text{ kV/cm}$

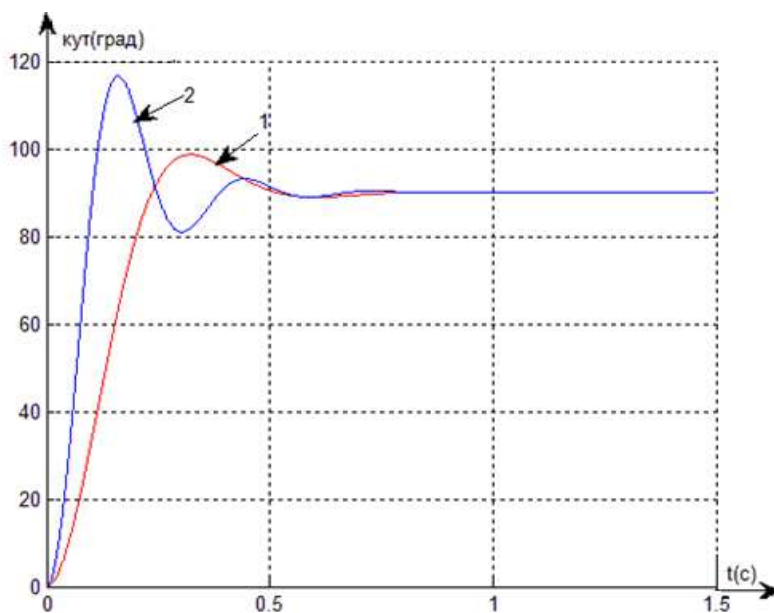
Величина напруженості електричного поля майже не впливає на час орієнтування насінин, однак із збільшенням її значення поворот насінини стає урівноваженим. Так, при напруженості  $4\text{ кВ/см}$  кут повороту становить  $120^\circ$ .

Розміри насінин еліптичної форми характеризуються осями еліпсоїда  $a$  і  $b$ . Дослідивши поведінку вівса і пшениці в електричному полі, встановлено, що їх геометричні

параметри не впливають на час їх орієнтування. Так, при різниці довшої осі  $a$  насіння вівса в  $5,7\text{ мм}$  (майже у  $2,5$  раза), порівняно з насінням пшениці з отриманих графіків (рис. 5 і 6), видно, що час зміни кута  $\varphi$  від  $0^\circ$  до  $90^\circ$  становить менше 1 секунди ( $0,75\dots 0,8\text{ с}$ ).

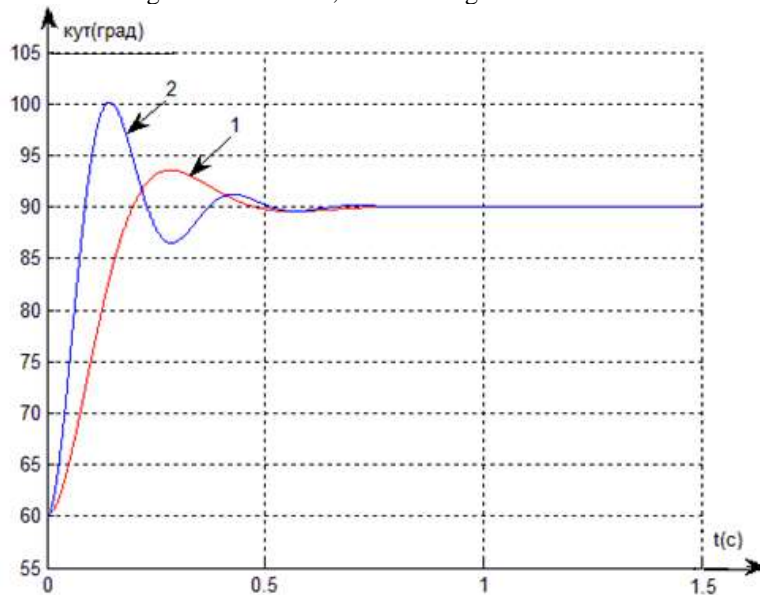
На рис. 7 наведено результати впливу початкового положення насінини на ефективність його орієнтування.





**Рис. 6.** Графік зміни кута повороту насіння вівса при різних значеннях напруженості електростатичного поля: 1 – за напруженості  $E=1$  кВ/см; 2 – за напруженості  $E=3$  кВ/см

**Fig. 6.** Graph of changes in the angle of oat seeds rotation at different values of the electrostatic field intensity: 1 – at voltage of  $E=1$  kV/cm; 2 – at voltage of  $E=3$  kV/cm



**Рис. 7.** Графік зміни кута повороту насіння вівса при різних значеннях напруженості електростатичного поля при  $\varphi_0=60^\circ$ : 1 – за напруженості  $E=1$  кВ/см; 2 – за напруженості  $E=3$  кВ/см

**Fig. 7.** Graph of changes in the angle of oat seeds rotation at different values of the electrostatic field strength at  $\varphi_0=60^\circ$ :

1 – at voltage of  $E=1$  kV/cm; 2 – at voltage of  $E=3$  kV/cm

Встановлено, що хаотичне (початкове) положення насінини в електричному полі також не має суттєвого впливу на час орієнтування насінин (рис. 7). Однак максимальний кут  $\varphi$ , на який повертатиметься насінини від свого початкового положення, зменшується зі збільшенням початкового кута  $\varphi_0$ .

## Висновки

Аналіз одержаних результатів показує, що використання двокомпонентних коливань робочого органу (решета) значно підвищує продуктивність обладнання. Порівняно з однокомпонентними коливаннями вона зростає на 18...25 %.



Оптимальне значення напруженості електричного поля в робочій зоні вібраційного електросепаратора, необхідне для орієнтування насіння в напрямі переміщення, повинно становити 3 кВ/см. Кількість непросіяного через решето з прямокутними отворами насіння становить менше 30 %.

За результатами досліджень встановлено, що забезпеченням відповідних параметрів роботи технологічного обладнання можна значно інтенсифікувати процес просіювання компонентів суміші через отвори решета і тим самим зменшити його робочу площу, а отже, поліпшити технічну характеристику сепаратора.

Крім того, поєднання розглянутих ефектів можна використати не лише під час сепарування чи міжопераційного транспортування матеріалів, а й у роботі пристроїв для їх автоматичного завантаження в технологічне обладнання, групового касетування і вкладання магазинів накопичувачів, де питання орієнтування виробів, особливо з незначними масово-геометричними параметрами, набувають важливого значення.

#### Бібліографічний список

1. Бацуровська І. О. Електротехнології: навч. посіб. Миколаїв: МНАУ, 2021. 258 с.
2. Бржезицький В. О., Козюра В. В., Козюра В. М. Застосування електричних і магнітних полів у промисловому та сільськогосподарському виробництві. Ч. 2: Технології, засновані на силовій дії електричних і магнітних полів: навч. посіб. Київ: ФЕА НТУУ «КПІ», 2016. 119 с.
3. Божедарник В. В., Сулим Г. Т. Елементи теорії пружності. Львів: Світ, 1994. 558 с.
4. Заїка П. М. Теорія сільськогосподарських машин. Очистка і сортування насіння. Харків: Око, 2006. Т. 3. 408 с.
5. Кодра Ю. В., Стоцько З. А., Гаврильченко О. В. Завантажувальні пристрої технологічних машин. Розрахунок і конструювання: навч. посіб. Львів: Бескид Біт, 2008. 356 с.
6. Коруняк П. С., Керницький І. С., Ніщенко І. І. Автоматизоване вібраційне маніпулювання виробами та вібрманіпулятори: монографія / за ред. В. В. Снітинського. Львів: Сполом, 2021. 256 с.
7. Коруняк П. С., Керницький І. С. Вібраційні машини у технологічних процесах та технологіях: навч. посіб. Львів: Сполом, 2019. 436 с.
8. Коруняк П. С., Ніщенко І. І., Керницький І. С. Транспортувальні машини. Основи конструювання та розрахунку вібраційних транспортувальних машин: навч. посіб. Львів: Сполом, 2017. 244 с.
9. Матвійчук В. А., Рубаненко О. Є., Стаднійчук І. П. Електротехнології в АПК: навч. посіб. Вінниця: Твори, 2020. 272 с.
10. Михайлов А. Д. Машина, агрегати та комплекси для післязбиральної обробки зерна і насіння. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2012. 78 с.
11. Ніколасенко К. В., Олійник Т. А., Прилипенко В. Д. Магнітні та електричні методи збагачення корисних копалин: підручник. Київ: Фенікс, 2011. 295 с.
12. Павловський М. А. Теоретична механіка. Київ: Техніка, 2002. 510 с.
13. Підвищення ефективності роботи вібраційного сепаратора / О. Швець, П. Коруняк, С. Баранович, С. Березовецький. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. 3 (106). С. 36-43.
14. Повидайло В. О. Вібраційні процеси та обладнання. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2004. 248 с.
15. Русаков В. Ф. Електрика та магнетизм: навч. посіб. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2020. 244 с.
16. Технологічні процеси та виробничі машини: підручник / П. С. Коруняк та ін.; за ред. В. В. Снітинського. Львів: Сполом, 2022. 452 с.
17. Техніка і електрофізика високих напруг: навч. посіб. / за ред. В. О. Бржезицького та В. М. Михайлова. Харків: НТУ «ХПІ» – Торнадо, 2005. 930 с.
18. Фізичні основи технології сепарування насіння сільськогосподарських культур / В. О. Паранюк, С. Й. Ковалишин, В. І. Мельничук, О. П. Швець. *Збірник наукових праць УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого: Техніко-технологічні аспекти розвитку та впровадження нової техніки і технологій для сільськогосподарства України*. 2007. Вип. 10 (24). С. 77–86.
19. Швець О., Барановський М. Дослідження можливості сепарування насіння райграсу пасовищного. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*. 2020. № 24. С. 63–68.
20. Швець О., Коруняк П. Віброрешітний електросепаратор зерна. *Вчені Львівського національного університету природокористування виробництва: каталог інноваційних розробок*. Львів: ЛНУП, 2022. Вип. 22. С. 35.
21. Швець О., Коруняк П. Вібраційний електросепаратор. *Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій: матеріали XXIII Міжнар. наук.-практ. форуму (4–6 жовт. 2022 р.)*. Львів: ЛНАУ, 2022. С. 428-431.
22. Швець О., Коруняк П. Підвищення ефективності просіювання зерна на віброрешітному електросепараторі. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Агроінженерні дослідження*. 2022. № 26. С. 64-70. doi:10.31734/agroengineering2022.26.064.
23. Швець О. П. Спосіб інтенсифікації процесу розділення зерна на решетах. *Вчені Львівського національного аграрного університету виробництва: каталог інноваційних розробок*. Львів: ЛНАУ, 2020. Вип. 20. С. 53.

Стаття надійшла 30.07.2023