

УДК 631.362

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.245-252](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.245-252)

Д. С. Недельський, Д. І. Петренко, доц., канд. техн. наук,
С. М. Лещенко, доц., канд. техн. наук, О. М. Васильковський, проф., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: petrenko.dimitriy@gmail.com

Мехатронний аналіз роботи пневмогравітаційного сепаратора зернових сумішей

За результатами проведеного аналізу результатів наукових досліджень в сфері післязбиральної обробки зернових сумішей виявлено, що на сьогодні питання функціонування пневмогравітаційних сепараторів зернових сумішей недостатньо вивчено. Зокрема відсутній мехатронний аналіз роботи даного типу сепараторів з запровадженням системи автоматичного коригування системи, що не дозволяє реалізувати принцип самоадаптації пневмогравітаційної системи до змінних умов процесу пневмосепарації зернових сумішей. З врахуванням цього, в роботі розглянуто мехатронну модель пневмогравітаційного сепаратора зернових сумішей з елементами автоматизації контролю та автокоригуванням процесу очищення зернових культур на основі спроектованого алгоритму його функціонування.

мехатроніка, аналіз, пневмогравітаційний сепаратор, післязбиральна обробка, алгоритм

Постановка проблеми. Одним з найважливіших процесів післязбирального обробітку зернових сумішей, який створює передумови подальшого використання чи зберігання, є сепарація за комплексом фізико-механічних або технологічних властивостей. Як відомо [1, 3, 4], найбільш універсальними фізико-механічними властивостями, за якими можливий поділ зернової суміші на компоненти, є розмірні параметри та аеродинамічні властивості. І, як показує практика використання зерноочисного обладнання, сепарація за аеродинамічними ознаками застосовується на всіх етапах післязбиральної обробки [1, 3].

Відповідно, на сьогоднішній день розроблено, досліджено і введено в експлуатацію досить широкий спектр пневмосепараторів і як самостійний клас машин, і в складі комбінованих зерноочисних машин [1-4, 7]. Однак, існуючі конструктивні схеми не дозволяють отримати необхідну якість процесу при забезпеченні продуктивності на рівні решітних машин [3], що пов'язано зокрема і з неможливістю адаптації пневмосепаруючих систем до змінних умов процесу, серед яких стан і фізико-механічні властивості компонентів зерноsumіші, а це зменшує ефективність їх застосування. Тому постає необхідність пошуку нових шляхів розвитку зерноочисної техніки повітряного типу.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Загальновідомі типи пневмосепараторів дослідники класифікують за типом пневмоканалу (вертикальний, горизонтальний, похилий, криволінійний, загзагоподібний тощо) та формою його перерізу (прямокутна, кругла, кільцева і т. ін.), способом взаємодії зерноsumіші з повітряним потоком (так звані способи «зважування» і «відхилення») і методом завантаження до повітряного каналу (одно- чи багаторівневий, струменями, під кутом до напрямку дії повітряного потоку тощо) [1, 3, 8]. Основна ідея створення «ідеального» пневмосепаратора – забезпечення рівномірного завантаження зерноsumіші та створення ідентичних умов взаємодії з рівномірним за швидкісним полем потоком повітря.

Одним з прикладів спроби створити найбільш оптимальний за цими параметрами

сепаратор є зерноочисна машина пневмогравітаційного типу [5, 9], в якій реалізовано принцип комбінованої дії сил інерції і повітряного потоку на зернову суміш.

В загальному випадку рух компонентів зерносуміші в даному сепараторі на початковому етапі відбувається за загальновідомими законами вільного падіння тіла з початковою швидкістю V_0 [1, 3, 6]:

$$V = V_0 + g \cdot t,$$

де g – значення прискорення вільного падіння;

t – час, протягом якого відбувається вільне падіння.

При цьому, вільному падінню компонентів зерносуміші перешкоджає аеродинамічний опір середовища, сила якого, як відомо [1, 3], визначається залежністю

$$P_0 = m \cdot k_v \cdot V_a^2,$$

де m – маса компонента;

k_v – коефіцієнт парусності;

V_a – величина абсолютної швидкості компоненту.

В зоні розміщення жалюзійних повітрязабірників, які розташовані на висоті H від місця подачі, на зерносуміш починає діяти сила повітряного потоку R , яка зміщує траєкторії компонентів зерносуміші залежно від їх аеродинамічних властивостей [1, 3]:

$$R = m \cdot k_v \cdot (V_a - U \cdot \cos \alpha)^2$$

де U – швидкість повітряного потоку;

α – кут, під яким повітряний потік діє на компонент.

Таким чином, аналіз наукових досліджень закономірностей переміщення зернової суміші під дією повітряного потоку дозволив встановити, що основні принципи визначення теоретичних властивостей поведінки компонентів зерносуміші як окремих часток під дією фізичних сил вже відомі. Але постає необхідність розглядати компоненти не лише як одиничні частки, а як систему, яка взаємодіє з оточуючим середовищем та іншими системами. Більшість методів засновано на дослідженні зміщення точок (часток), які характеризуються відповідними властивостями, відносно їх початкового положення під дією зовнішніх сил [1-4]. Тут значно ускладнюється точність розрахунків аналітичним методом через початкове випадкове положення частинок відносно робочих органів машини.

Іншим питанням, що потребує вирішення, є необхідність запровадження системи автокоригування системи при зміні умов функціонування. Відомі спроби запровадити автоматизовану систему приводу заслінок для забезпечення прямого рівномірного розподілу швидкості подачі повітря [2], проте даний метод автокоригування носить одиничний характер та не володіє системністю вирішення задач адаптування зерноочисної системи.

Натомість, на сьогодні вже гостро постало питання застосування системного підходу до автокоригування техніко-технологічних систем, які використовуються в агропромисловому виробництві, що, як підтверджують автори [3, 5-7], можливо реалізувати при використанні мехатронних підходів при побудові і дослідженні даних систем.

Постановка завдання. Дослідження технологічного процесу та обґрунтування параметрів сепаратора з вертикальним каналом пневмогравітаційного типу для

очищення та сортування зернових сумішей з використанням мехатронних систем для забезпечення автокоригування процесу.

Виклад основного матеріалу. Пневмогравітаційний сепаратор [9] призначений для розділення зернових сумішей на компоненти за аеродинамічними властивостями з використанням повітряного потоку. Основними робочими елементами сепаратора (рис. 2) є система завантаження, вертикальний канал пневмогравітаційного типу з розміщеними на висоті H жалюзі, повітрязабірник, система створення повітряного потоку та видалення (осадження) легких компонентів (домішок).

У вертикальному повітряно-гравітаційному каналі створюються умови попереднього розшарування і розподілення компонентів зернової суміші під час переміщення за рахунок взаємодії сил гравітації та аеродинамічного опору середовища. Це дозволяє отримати в зоні жалюзі, де діє структурований повітряний потік, підвищення ефективності відбору легкого компонента із загальної маси.

Як зазначалось, поведінка компонентів зернової суміші в даній системі досить досліджена і постає питання автокерування системами, які дозволять зменшити потребу втручання оператора в контроль над процесом сепарації. Відповідно до мехатронного підходу, весь контроль необхідно перекласти на системи, серед яких блок керування, який, отримавши дані від датчиків, розміщених в ключових точках контролю, аналізує в онлайн режимі надіслані дані та надсилає коригуючі (виконавчі) сигнали на робочі елементи керування. Серед найчастіше застосовуваних елементів керування відомі крокові серводвигуни, сервоприводи тощо, або елементи взаємодії з оператором, серед яких сигнальні лампи, екранні модулі тощо, задачами яких є інформування оператора про протікання процесу сепарації [7, 10, 11].

Найскладнішими елементами мехатронного модулю є процеси налагодження програмного модуля блоку керування, який використовується для обробки даних, передачі та обробки отриманих даних від датчиків, вибір датчиків та їх калібрування відповідно до реальних умов експлуатації, оскільки одержані результати замірів матимуть прямий вплив на точність показників, які надходять для інтерпретації до блоку програмного контролю. Важливим елементом є і обґрунтування місця розміщення датчиків, яке повинно відповідати умові точного і вчасного вимірювання параметрів, які впливають на процес сепарації. Вимогою до робочих елементів керування є відповідність кроку регулювання заданому діапазону та точність виконання рухів.

Таким чином, першочерговим кроком при проектуванні мехатронної системи сепаратора є розробка блок-схеми алгоритму його роботи (рис. 1), яка характеризує послідовність процесу, що дозволить обґрунтувати фактори впливу на процес сепарації та визначити точки контролю в системі. В даному випадку серед факторів впливу слід виділити, в першу чергу, параметри повітряного потоку та параметри вхідного матеріалу (тип зернової суміші, її вологість).

Для забезпечення точного контролю за процесом сепарації та автоматичного коригування параметрів системи доцільним є використання систем автоматизації процесів, зокрема щодо контролю потужності приводу вентилятора, швидкості повітряного потоку в зоні сепарації, подачі зернової суміші до зони сепарації.

Враховуючи розроблений алгоритм (рис. 1), проектуємо мехатронну систему пневмогравітаційного сепаратора (рис. 2), де наведено розташування елементів керування та датчиків системи контролю за процесом пневмогравітаційної сепарації.

Подача зернової суміші починається з бункера, де розташовано активний крильчатий живильник, оснащений датчиком частоти обертання, який задає контрольований потік зернової суміші відповідно заданим параметрам. В якості

виконавчого елемента, який забезпечить автоматизацію процесу точного коригування подачі, пропонується використати кроковий серводвигун LeadShine 3DM580S [10, 11], що має рух штока навколо своєї осі з заданою частотою обертів в діапазоні $5 \dots 100 \text{ хв}^{-1}$, а напруга живлення становить 12 В. Досить важливим є контроль вхідної вологості зернової суміші, тому в бункері варто встановити звичайний універсальний врізний цифровий датчик вологи (н-д гігрометр ХН-В403 [10]), який дозволяє через мікроконтролер виводити на інформаційний LCD дисплей блоку керування дані про рівень загальної вологості зернової суміші у відсотковому еквіваленті. Він також має напругу живлення 12 В.

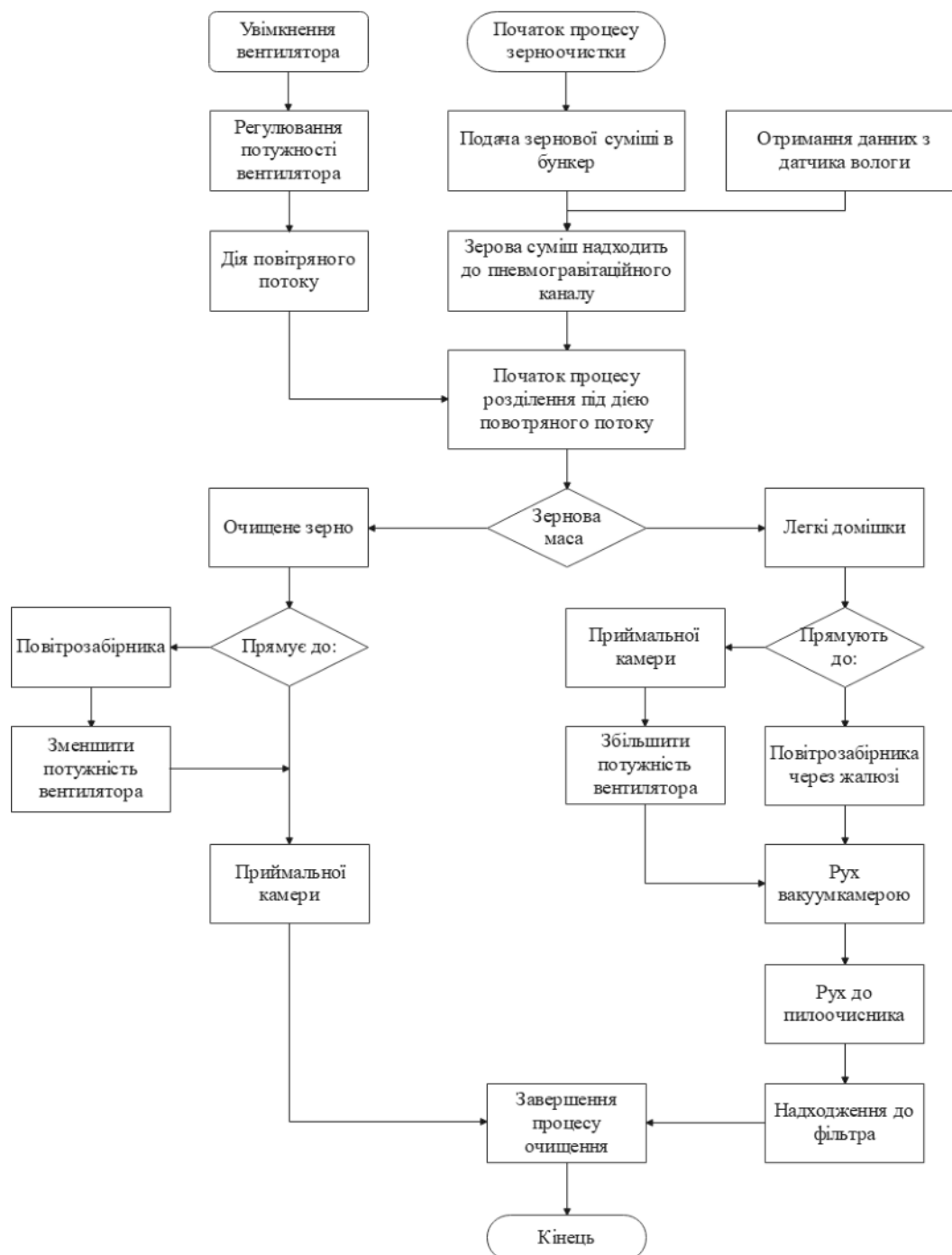


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму роботи пневмогравітаційного сепаратора
Джерело: розроблено авторами

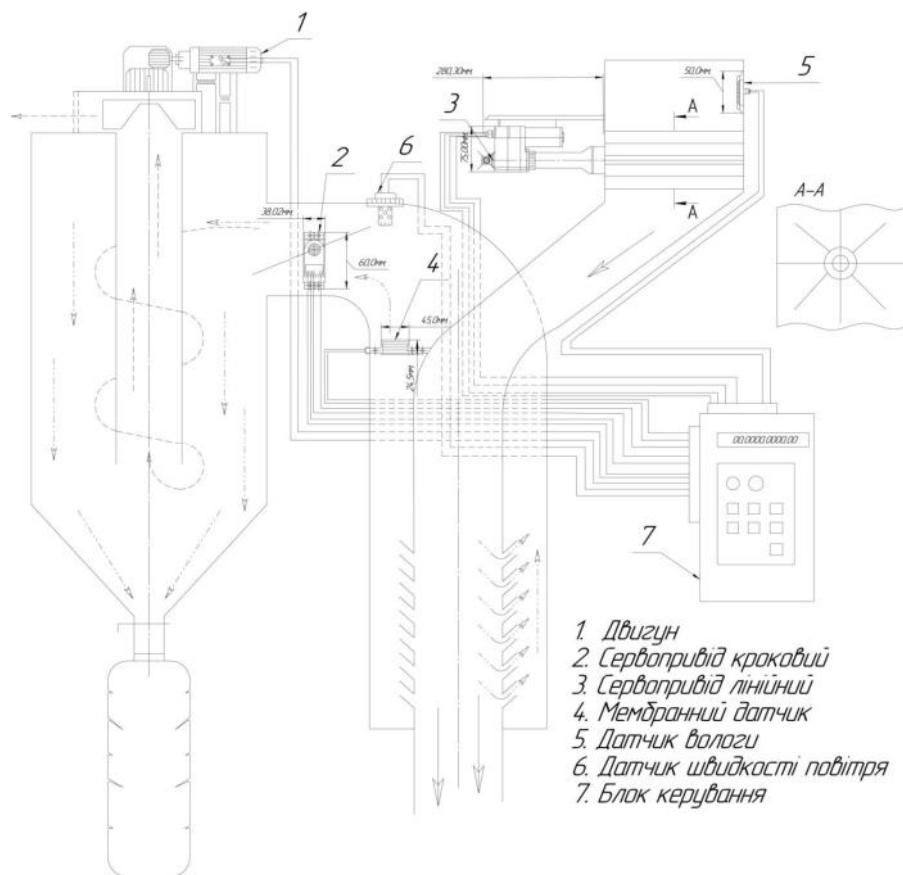


Рисунок 2 – Схема пневмогравітаційного сепаратора

Джерело: розроблено авторами на підставі [9]

В пневмогравітаційному каналі для забезпечення керування швидкістю повітряного потоку необхідно встановити заслінку, для керування якою пропонується використати сервопривод звичайного типу SERVO-MG995-360 [11, 12], в якому вал обертається навколо своєї осі з заданим кроком. Даний сервопривод має діапазон напруги живлення 4,8...7,2 В, що дозволяє забезпечити зусилля на валу в межах 9 кг/см (при напрузі 4,8 В)...12 кг/см (при напрузі 6 В). Кут повороту валу при цьому становить 360°, а керування відбувається за допомогою широтно-імпульсної модуляції, що дозволяє точно контролювати кут відкриття заслінки з швидкістю повороту валу 60°/ 0,13 сек.

Сервопривод, який задає точне положення заслінки регулювання швидкості повітряного потоку, отримує сигнали від блоку керування, а дані для відповідного коригування надходять від датчиків, розміщених у вакуум-камері. Дані з датчиків надходять до блоку керування, де відповідно до програми розраховується кут зсуву валу крокового двигуна відносно початкового положення, та надсилається коригуючий сигнал.

Показниками якості сепарації є рівень чистоти матеріалу на виході та втрати основної фракції у відходах. Основною з задач є мінімізація втрат зерна через вакуумкамеру, що залежить від точного регулювання швидкості повітряного потоку, і які можливо проконтролювати, виходячи з даних про кількість зерна, яке проходить через вакуумкамеру. Такі дані можна отримати за допомогою перетворювача каналу зусилля [10-12]. Даний вимірювальний пристрій представляє собою сукупність елементів, таких, як тензорезисторний сенсор зусилля, вимірювальний підсилювач та аналогово-цифровий перетворювач. Сенсор зусилля являє собою прилад з чутливим до деформації елементом у вигляді сапфірової мембрани з кремнієвими тензорезисторами. Механічне зусилля чинить тиск на мембрану від чого вона деформується, змінюючи

опір схеми тензорезисторів, що призводить до зміни вихідної напруги. Перевагою такого сенсора є його висока чутливість та здатність точно відтворити імпульси впливу на мембрану та його пило-вологозахист. Також він є нечутливий до вібрацій та ударів об корпус і його компоненти можуть бути використані в сепараторі.

Основною його задачею є чутливість до появи зернових часток в повітряному потоці вакуумкамери, при цьому реакція на повітряний потік, пилові частки і легкі домішки повинна бути відсутня. Механічного впливу легких домішок не достатньо для значної деформації мембрани, тобто вона є мінімальною, через що вихідний сигнал відсутній. А ось зерно, яке потрапило до вакуумкамери, взаємодіє з сенсором, це спричиняє суттєве відхилення мембрани на величину, яка у 8 раз може перевищувати вплив домішок, що зумовлено вагою зерна та його прискоренням, отже цієї величини деформації достатньо для появи імпульсу на виході (рис. 3).

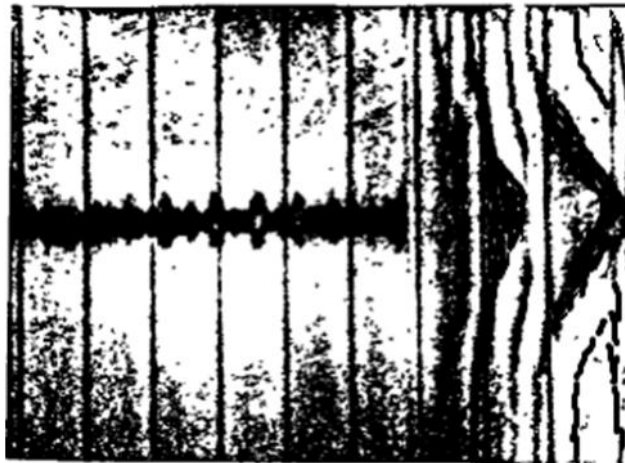


Рисунок 3 – Осцилограма сигналів вимірювального підсилювача при потрапінні на мембрану зернівки

Джерело: розроблено на підставі [12]

Контроль точності регулювання швидкості повітряного потоку пропонується здійснювати за допомогою датчика швидкості повітряного потоку (н-д 641-6 [10-12]), розташованого в патрубку вакуумкамери.

Отримані дані з усіх датчиків передаються на блок керування, де програмним методом розрахунку буде здійснюватися контроль над передачею імпульсів на приводи регулювання заслінками для забезпечення оптимальної швидкості подачі зернової маси і контролю якості очищення.

Висновки. 1. Проведений аналіз наукових досліджень підтвердив недостатній рівень вивчення мехатронного підходу до автоматизації пневмогравітаційних сепараторів зернових сумішей, що стримує реалізацію принципу самоадаптації системи до змінних умов процесу очищення зернових матеріалів від домішок.

2. Розроблено алгоритм функціонування пневмогравітаційного сепаратора з урахуванням мехатронного підходу, який передбачає автоматичний контроль і коригування параметрів роботи пневмогравітаційного сепаратора у режимі реального часу на основі даних від датчиків.

3. Запропонована конструкція мехатронної системи включає:

– датчик вологості в бункері завантаження, діапазон вимірювання якого становить 0...99%, що дозволяє корегувати ступінь завантаження пневмогравітаційного каналу з точністю до 5%;

– датчик частоти обертання активного живильника, який забезпечує контроль кута відкриття заслінки регулювання швидкості повітряного потоку з швидкістю повороту валу $60^\circ/0,13$ сек. і працює в парі з сервоприводом регулювання заслінки швидкості повітряного потоку, що забезпечує зусилля на валу в межах 9...12 кг/см, яке дозволяє змінювати продуктивність завантаження з точністю до 8%.

– тензорезисторний сенсор зусилля для контролю втрат основної фракції, який в тандемі з датчиком швидкості повітряного потоку у вакуумкамері забезпечує точність регулювання заслінки у вакуумкамері до 0,2%.

4. Використання сервоприводів та крокових двигунів у системі дозволяє здійснювати точність регулювання питомої подачі матеріалу в діапазоні 0,1...0,8 кг/дм³·год при вторинному очищенні та параметрів і режимів руху повітряного потоку в діапазоні до 0,5 м/с, що підвищує ефективність виділення домішок на 14% і зменшує втрати повноцінного зерна на 30%.

5. Запропонована мехатронна система пневмогравітаційного сепаратора дозволяє забезпечити підвищення продуктивності та енергоефективності процесу післязбиральної обробки зерна, а також може бути основою для створення адаптивних зерноочисних машин нового покоління.

Список літератури

1. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентильовання, охолодження) : колект. монографія / Котов Б. І. та ін.; Нац. акад. аграр. наук України, Нац. наук. центр "Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва". Київ; Ніжин : Лисенко М. М. [вид.], 2017. 551 с.
2. Алієв Е. Б., Гаврильченко О. С. Обґрунтування автоматизованої системи керування потоком повітря в аеродинамічному сепараторі насінневого матеріалу. *Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві. Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Харків. 2019. Вип. 201. С. 132–140.
3. Степаненко С. П. Механіко-технологічне обґрунтування процесів і обладнання безрешітного фракціонування зернових матеріалів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Глеваха. 2020. 362 с.
4. Обґрунтування конструктивної схеми пневморешітного сепаратора зерна / Васильковський О.М. та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. Кропивницький: ЦНТУ. Вип. 51. 2021. С. 104-110. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.104-110>.
5. Недельський Д.С., Петренко Д.І. Мехатронні принципи керування зерноочисними сепараторами. *Вісник Степу. Науковий збірник ІСГС НААН*. Вип. 22. Вінниця : НЛАН-ЛТД, 2025. С. 84-86.
6. Алієв Е.Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва : підручник. Київ : Аграрна наука, 2023. 340 с. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9.
7. Aliiev E. Lupko K. Kobets O. Development of adaptive seed-separation trier for small-seeded crops. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*. 2023. 16 (65), 1. P. 103–126. DOI: 10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.1.8.
8. Нестеренко О.В., Лещенко С.М., Васильковський О.М., Петренко Д.І. Оцінка рівномірності розподілу та засміченості зерна при його багаторівневому введенні в пневмосепаруючий канал. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. Кропивницький : ЦНТУ. Вип. 51. 2021. С. 111-116. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.111-116>.
9. Пневмогравітаційний сепаратор : пат. 153219 Україна : МПК В07В 4/02 (2006.01), В07В 7/01 (2006.01). № у 202203732 ; заявл. 05.10.2022 ; опубл. 07.06.2023, Бюл. № 23/2023.
10. Вимірювальні перетворювачі : лабораторний практикум / В. Ю. Кучерук, В.М. Севаст'янов, О.Г. Ігнатенко, В.С. Маньковська. Вінниця: ВНТУ, 2013. 183 с.
11. Мехатроніка : підручник / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич, В.В. Крушельницький. К.: ЦП „Компрінт”, 2020. 404 с.
12. Яхно О.М., Узунов О.В., Луговський О.Ф. та ін. Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка: підручник. Вінниця: ВНТУ, 2017. 711 с.

References

1. Kotov, B. I., et al. (2017). *Modeling of technological processes in typical objects of post-harvest grain processing and storage (cleaning, separation, drying, active ventilation, cooling): Collective monograph*.

- National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, National Scientific Center “Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture”. Kyiv; Nizhyn: Lysenko M. M. Publishing [in Ukrainian].
2. Aliiev, E. B., & Havrylchenko, O. S. (2019). *Justification of an automated air flow control system in an aerodynamic seed separator. Modern Problems of Improving Technical Systems and Technologies in Animal Husbandry. Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko*, (201), 132–140 [in Ukrainian].
 3. Stepanenko, S. P. (2020). *Mechanical and technological substantiation of processes and equipment for sieve-free fractionation of grain materials* (Doctoral dissertation). Hlevakha [in Ukrainian].
 4. Vasylovskiy, O. M., et al. (2021). *Justification of the design scheme of a pneumatic-sieve grain separator. Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (51), 104–110. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.104-110> [in Ukrainian].
 5. Niedelskyi, D. S., & Petrenko, D. I. (2025). *Mechatronic principles of controlling grain-cleaning separators. Steppe Bulletin. Scientific Collection of ISGS NAAS*, (22), 84–86 [in Ukrainian].
 6. Aliiev, E. B. (2023). *Numerical modeling of agro-industrial production processes: Textbook*. Kyiv: Agrarian Science. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9> [in Ukrainian].
 7. Aliiev, E., Lupko, K., & Kobets, O. (2023). Development of adaptive seed-separation trier for small-seeded crops. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 16(65/1), 103–126. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.1.8>
 8. Nesterenko, O. V., Leshchenko, S. M., Vasylovskiy, O. M., & Petrenko, D. I. (2021). *Evaluation of uniformity of distribution and contamination of grain during its multilevel introduction into the pneumatic-separating channel. Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, (51), 111–116. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.111-116> [in Ukrainian].
 9. *Pneumogravitational separator*: Patent 153219 Ukraine: IPC B07B 4/02 (2006.01), B07B 7/01 (2006.01). No. u 202203732; filed 05.10.2022; published 07.06.2023, Bulletin No. 23/2023 [in Ukrainian].
 10. Kucheruk, V. Yu., Sevastyanov, V. M., Ihnatenko, O. H., & Mankovska, V. S. (2013). *Measuring transducers: Laboratory workshop*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
 11. Loveikin, V. S., Romasevych, Yu. O., & Krushelnyskyi, V. V. (2020). *Mechatronics: Textbook*. Kyiv: CP Komprint [in Ukrainian].
 12. Yakhno, O. M., Uzunov, O. V., Luhovskyi, O. F., et al. (2017). *Applied hydroaeromechanics and mechatronics: Textbook*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].

Dmytro Nedelsky, Dmytro Petrenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Leshchenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksii Vasylovsky**, Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Mechatronic Analysis the Operation of a Pneumogravity Separator for Grain Mixtures

The analysis of the results of scientific research in the field of post-harvest processing of grain mixtures revealed that today the issue of the functioning of pneumogravity separators of grain mixtures has not been sufficiently studied. In particular, there is no mechatronic analysis of the operation of this type of separators with the introduction of an automatic correction system of the system, which does not allow implementing the principle of self-adaptation of the pneumogravity system to the changing conditions of the process of pneumoseparation of grain mixtures. Taking this into account, the work considers a mechatronic model of a pneumogravity separator of grain mixtures with elements of automation of control and auto-correction of the process of cleaning grain crops based on the designed algorithm of its functioning.

Analytical studies are presented that formed the basis for the development and characteristics of the mechatronic system of a pneumogravity separator. The key element of the system is the built-in auto-correction system of the process of cleaning the grain mixture, which ensures increased efficiency. For a better understanding of the functioning, a block diagram of the separator operation has been developed, which details the stages of separation from loading the grain mass to obtaining cleaned grain. A scheme for receiving and processing data from sensors in the system control unit is also presented. The proposed algorithm for designing mechatronic systems using the example of a pneumatic-gravity separator allows significantly increasing the efficiency of pneumatic grain separation due to continuous monitoring of process indicators, data analysis, and automatic adjustment of set parameters in real time.

mechatronics, analysis, pneumogravity separator, post-harvest processing, algorithm

Одержано (Received) 16.06.2025

Прорецензовано (Reviewed) 31.07.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025