



УДК 681.516.5

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПОМЕЛУ МАКУХИ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР

AUTOMATION OF THE OILSEED PRESS CAKE GRINDING PROCESS

Муратов В.Г.¹, Левінський В.М.²
Muratov V.H.¹, Levinskyi V.M.²

^{1,2} Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

^{1,2} Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-4196-7248>, ²<https://orcid.org/0000-0002-3563-528X>

E-mail: ¹vikgorge@ukr.net, ²ValeryLevinskyi@gmail.com

Copyright © 2026 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: 10.15673/atbp.v18i1.3426

Анотація. Переробка олійних культур на олію та макуху є критично важливим етапом у ланцюгу виробництва продукції харчової, м'ясної та комбікормової промисловості. Макуха, як вторинна сировина, потребує ретельного подрібнення для подальшого використання як білкової добавки. Ефективність цього процесу безпосередньо залежить від стабільності дисперсного складу готового продукту. Враховуючи нестаціонарність фізико-механічних властивостей сировини (вологість, твердість, вміст жиру), розробка нових типів подрібнювального обладнання та вдосконалення систем автоматичного керування ними є актуальним науково-технічним завданням, що дозволить знизити енерговитрати та покращити якість кінцевого продукту.

Основною метою даного дослідження є розробка конструктивної схеми млина та системи керування, яка забезпечує автоматичну стабілізацію заданої дисперсності помелу готового продукту шляхом регулювання параметрів електроприводів та подачі сировини в умовах мінливого зовнішнього навантаження.

Для досягнення поставленої мети використано комплексний підхід, що включає експериментальні дослідження кінетики помелу на лабораторній установці та математичне моделювання динамічних процесів. Моделювання системи автоматичного регулювання (САР) проведено в спеціалізованому програмному середовищі Simulink (MATLAB). Це дозволило оцінити перехідні процеси в системі та визначити оптимальні налаштування регуляторів для каскадних структур керування.

У роботі представлено детальну структуру та опис принципу дії розробленого млина для переробки макухи олійних культур. Виявлено та проаналізовано основні проблеми, що виникають при коливаннях об'ємної подачі сировини, які призводять до нерівномірного навантаження на робочі органи та погіршення якості подрібнення. Запропоновано дворівневу систему автоматичної стабілізації струму навантаження електроприводів млина. Результати моделювання підтвердили, що запропонована схема дозволяє ефективно компенсувати збурення за каналом подачі, забезпечуючи відхилення робочих параметрів у межах допуску.

Встановлено, що впровадження САР каскадної структури дозволяє підвищити точність підтримання заданого гранулометричного складу макухи на 12–15% у порівнянні з розімкненими системами. Розроблена система може бути рекомендована для модернізації існуючих ліній виробництва комбікормів та на підприємствах з переробки олійної сировини для стабілізації технологічних режимів подрібнення.

Abstract. Processing of oilseeds into oil and press cake is a critically important stage in the production chain of the food, meat, and mixed fodder industries. Press cake, as a secondary raw material, requires careful grinding for further use as a protein additive. The efficiency of this process directly depends on the stability of the finished product's particle size distribution. Given the non-stationary physical and mechanical properties of the raw material (moisture, hardness, fat content), developing new types of grinding equipment and improving their automatic control systems is a relevant scientific and technical task that will reduce energy consumption and improve end-product quality.



The main objective of this study is to develop a structural design of a mill and a control system that ensures automatic stabilization of the specified grinding fineness of the finished product by adjusting the parameters of electric drives and raw material feed under conditions of varying external loads.

To achieve this goal, a comprehensive approach was used, including experimental studies of grinding kinetics on a laboratory unit and mathematical modeling of dynamic processes. The modeling of the automatic control system (ACS) was carried out in the specialized Simulink (MATLAB) software environment. This allowed for evaluating the transient processes in the system and determining the optimal controller settings for cascade control structures.

The paper presents a detailed structure and description of the operating principle of the developed mill for oilseed press cake processing. The main problems arising from fluctuations in the volumetric feed of raw materials, which lead to uneven loads on the working parts and deterioration of grinding quality, are identified and analyzed. A two-level system for automatic stabilization of the load current of the mill's electric drives is proposed. The modeling results confirmed that the proposed scheme effectively compensates for disturbances in the feed channel, ensuring that operating parameters remain within tolerance limits.

It was found that the implementation of a cascade-structured ACS allows increasing the accuracy of maintaining the specified granulometric composition of the press cake by 12–15% compared to open-loop systems. The developed system can be recommended for modernizing existing mixed fodder production lines and at oilseed processing enterprises to stabilize technological grinding modes.

Keywords: mill for meal grinding, system for automatic stabilization of the load current of the mill electric drives, ACS of the cascade structure.

Ключові слова: млин для помелу макухи, система автоматичної стабілізації струму навантаження електроприводів млина, САР каскадної структури.

Вступ

Переробка олійних культур на олію і макуху (шрот) широко застосовується при виробництві великого різноманіття продуктів харчової, м'ясної, комбікормової та інших галузей промисловості, наприклад, харчових додатків, соусів, майонезів, гірчиць та комбікормів.

Сьогодні існує зростаючий попит на автоматизоване обладнання переробки олійних культур, наприклад, для фермерських господарств.

Аналіз літературних джерел і постановка проблеми

У відповідності до цього нами, серед іншого [1], розроблений млин [2] для помелу макухи (шроту) для отримання порошків гірчиці, сої та іншого.

Розроблений млин забезпечує автоматичну стабілізацію завданої дисперсності помелу готового продукту за рахунок використання якісних властивостей аеро-сепараторів і ударно-відцентрових подрібнювачів в поєднанні з раціональною послідовністю їх включення в розмельний процес при одночасному удосконаленні їх конструкції.

Мета і завдання дослідження

Задача вирішується шляхом помелу макухи в два етапи, причому на першому етапі макуху подрібнюють шляхом ударно-відцентрового подрібнення низької інтенсивності до розмірів крупки з розмірами часток не більше 1 ... 2 мм та змішують з відсепарованими великими частками готового порошку, що поступають на рециркуляцію, а на другому етапі цю суміш остаточно подрібнюють шляхом ударно-відцентрового подрібнення високої інтенсивності (в дезінтеграторі) до заданої кондиції готового порошку.

Задача вирішується також тим, що лопатний ротор ударно-відцентрового подрібнювача низької інтенсивності (першого етапу) обертається у вертикальному циліндрі з перфорованими стінками та дном, причому отвори, розташовані рядами у шаховому порядку, мають діаметр 8 ... 10 мм, а в змішувальну камеру цього подрібнювача, яка облаштована магнітним сепаратором металодомішок, самопливом направляють такі потоки: під кутом 65° до горизонту – макухи після першого етапу подрібнення, під кутом 80° до горизонту – рециркуляційного потоку відсепарованих великих часток готового порошку.

Вихідна модифікація млина була введена в експлуатацію в 1995 році на Одеському заводі кісточкових олій вперше в Україні для виробництва гірчичного порошку, а за сприяння д.т.н. проф. ОНТУ А.П. Левицького і для виробництва соєвого борошна.

Методи і матеріали досліджень

На рис. 1 показана конструкція одної з останніх модифікацій млина, що вміщує приймальні патрубки макухи 1 та великих часток 2 (рециркуляції) готового порошку, ударно-відцентровий подрібнювач 3 першого етапу подрібнення, змішувальну камеру 4, штифтовий подрібнювач-дезінтегратор 5 другого етапу помелу з трубопроводом 6 подачі порошку в сепаратор 7 та вібраційний транспортер 8 рециркуляції. Пристрій має у своєму складі магнітні сепаратори 9 металевих домішок вхідних та вихідних потоків.

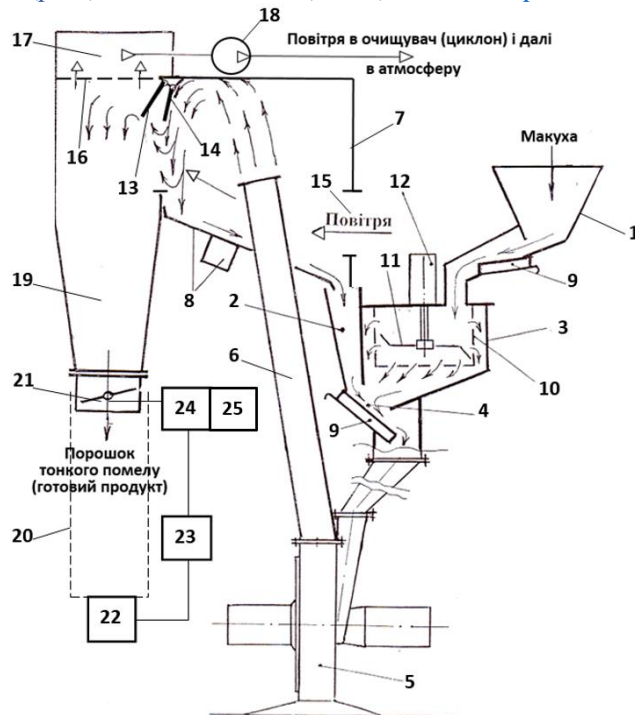


Рис. 1 Конструкція розробленого млина
Fig. 1 Design of the developed mill

Млин працює наступним чином. Сировина з бункера або сховища шнеком (тут не показаним) поступає в подрібнювач 3 першого етапу подрібнення крізь патрубок 1 і магнітний сепаратор 9 зверху у внутрішню порожнину перфорованого циліндру 10, де в горизонтальній площині обертається лопать-ніж 11, який пов'язаний з валом електродвигуна 12. Тут в результаті деформації удару-зсуву-зрїзу, виникаючих при взаємодії макухи з перфорованою поверхнею циліндру 10, ножем 11, і при співударяннях шматків сировини між собою макуха подрібнюється і крізь отвори діаметром 8-10 мм бокових стінок та донця циліндру 10 виводиться із зони подрібнення.

В результаті експериментальних досліджень було встановлено, що при збільшенні або зменшенні цього діаметру знижується загальна продуктивність пристрою. В першому випадку збільшується загальні час помелу та питомі витрати електроенергії, а в другому – продуктивність падає за рахунок забивання перфорованих отворів циліндру 10 продуктами подрібнення олійних культур (особливо таких як гірчиця).

Подрібнена макуха після проходження отворів циліндру 10 поступає на дно корпусу подрібнювача 3, яке виконане під кутом 65° до горизонту, що виключає можливість “завалу” пристрою при його роботі. Частки макухи вздовж дна самопливом поступають в змішувальну камеру 4, куди одночасно подають рециркуляційний потік великих часток готового порошку. У зв'язку з тим, що кут відвалу порошку олійних культур достатньо високий, то для виключення “завалів” вхідного патрубка 2 рециркуляційний потік направляють в змішувальну камеру під кутом 80° до горизонту. Змішувальна камера 4 при цьому виготовлена з немагнітних матеріалів за виключенням стінки-панелі змішування, яка представляє собою плоский постійний магніт 8, який можна висувати назовні для очищення від металодомішок.

На другому етапі здобуту в камері 4 і очищену від металодомішок суміш самопливом направляють в дезінтегратор 5. В середині нього в різні боки зі швидкістю 3000 об/хв кожний обертаються два диски з робочими органами - штифтами, що розташовані в декількох концентричних колах з робочого боку цих дисків. В процесі високо-інтенсивного ударно-відцентрового подрібнення сировина, проходить від центру дезінтегратора крізь робочу зону і остаточно подрібнюється. Особливістю даних дисків є наявність лопатей з їх зовнішнього боку, що значно збільшує повітряний напір на виході дезінтегратора, який працює як вентилятор.

Результати помелу в суміші з потоком повітря з дезінтегратора 5 за допомогою трубопроводу 6 направляють у аеро-сепаратор 7, де порошок розділюють на фракції по сортах (дисперсності помелу).

Сепаратор 7 складається з двох камер, між якими є прямокутний отвір на всю ширину камер. Отвір обладнаний двома регулюючими заслінками 13 та 14 з індикаторами їхнього положення і ручками механічного переміщення.

В першій камері передбачений отвір 15 для проходу свіжого повітря з навколишнього середовища. В цю камеру, крім того, подають вихідний потік повітряно-порошкової суміші з трубопроводу 6. Цей потік взаємодіє із поворотною заслінкою 14 і, в залежності від її положення, змінює свій кут нахилу відносно площини отвору між камерами.



Друга камера аеро-сепаратору 7 розподілена рамою 16 з повітряним фільтром (мішковиною) на зону розрідження 17, яку створює витяжний вентилятор 18 і зону 19 вивантаження готового продукту у тару. При цьому рама 16 обладнана електромеханічним пристроєм (тут не показаний) періодичного струшування фільтру, що виключає його забивання.

Оскільки положення (кут поворотання) заслінки 13 встановлює площу перерізу отвору між камерами сепаратору 7, це дозволяє змінювати швидкість повітря в отворі між камерами.

Заслінку 14 при цьому використовують для поточного регулювання в певних границях дисперсності помелу готового продукту, а заслінку 13 – для зміни вказаних границь регулювання дисперсності, наприклад, у відповідності до результатів експрес-аналізу зразку готового продукту на виході сепаратору.

Практика показала, що нахил заслінок 13, 14 можна налагодити на певну якість помелу і не змінювати в процесі роботи. Тому заслінки 13 і 14, в залежності від свого положення, використовуються відповідно до стандарту [7], у якості задатчиків: вищого, першого, другого і третього сорту помелу сировини.

Переміщення регулюючих заслінок 13, 14 приводить до зміни співвідношення порошку, що поступає з повітрям в другу камеру (тонкий помел) або осідає на вібротранспортер 8 рециркуляції і направляється в патрубок 2 подрібнювача 3 грубого помелу.

Порошок, що осів в зоні вивантаження 19 другої камери фасують у мішки по 20 кг. Для цього оператор закріплює мішок 20 на вихідній горловині і ручкою відкриває заслінку 21, ставлячи її на застібку 24 зі світлодіодними сигнальними індикаторами 25 «Відкрито (зелений) – Зачинено (червоний)».

При заповненні чергового мішку за сигналом тензодатчика 22 контролер 23 автоматичного дозатору відкриває електромагнітну застібку 24, яка за допомогою зворотної пружини закриває заслінку 21.

Контроль процесу помелу здійснюють за допомогою щита керування з кнопковими станціями «Пуск-Стоп», магнітними пускачами та трансформаторами струму навантаження електродвигунів млина з відповідними амперметрами, що показують. Один щит обслуговує два млина.

Ядро автоматизованої системи керування млином (АСК) розміщена в окремому щитку для кожного млина. Тут розміщені мікропроцесорні контролери автоматичного регулювання навантаження млина та дозування готового продукту у тару.

Експериментальні дослідження млина як об'єкта керування показали, що за каналом струму навантаження подрібнювача 3 є практично безінерційною ланкою без запізнення, а дезінтегратор 5 – інерційною ланкою із запізненням у 8-10 с, що ускладнює контроль за його сталим режимом роботи.

Збільшення за норму подачі макухи, наприклад, при ручному керуванні призводить до зростання струму і перенавантаження електродвигунів дезінтегратора, зменшує вихідну швидкості його потоку, що погіршує процес розділення фракцій у сепараторі 7.

Для усунення цього недоліку в АСК ми використовували додатковий імпульс від коріолісового витратоміра потоку з трубопроводу 6 [4], встановивши на цей трубопровід трубопровід ємнісний датчик витрат/густини двофазного потоку [5]. Але найбільш ефективним виявився додатковий сигнал від трансформатора струму подрібнювача 3.

Результати досліджень

Наявність цього сигналу дозволяє побудувати каскадну САР, в якій внутрішній або додатковий регулятор стабілізує струм навантаження привідного електродвигуна (ПЕД) подрібнювача за рахунок зміни витрат сировини, а зовнішній або головний регулятор стабілізує струм навантаження ПЕД дезінтегратора за рахунок зміни завдання внутрішньому регулятору.

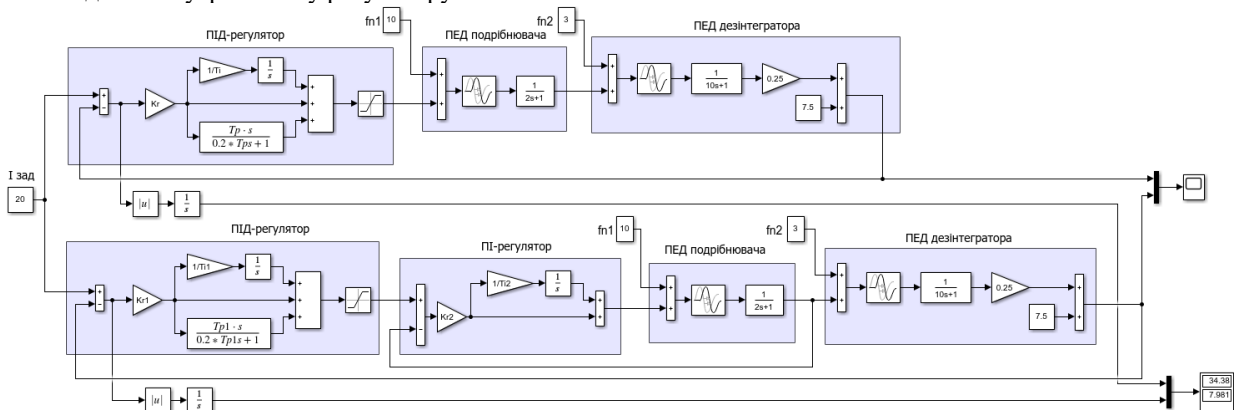


Рис. 2 Схема моделювання САР базової структури і каскадної САР
Fig. 2 Scheme of modeling of the basic structure of the ATS and the cascade ATS

На рис. 2 наведена схема моделювання САР базової структури з ПІД-регулятором і каскадної САР в середовищі Simulink/Matlab.



Оскільки внутрішній контур є малоінерційним, то це дозволяє суттєво зменшити вплив коливань зовнішніх неконтрольованих збурень f_{n1} на струм навантаження ПЕД дезінтегратора. Підтвердженням цього є результати моделювання, які наведені на рис. 3.

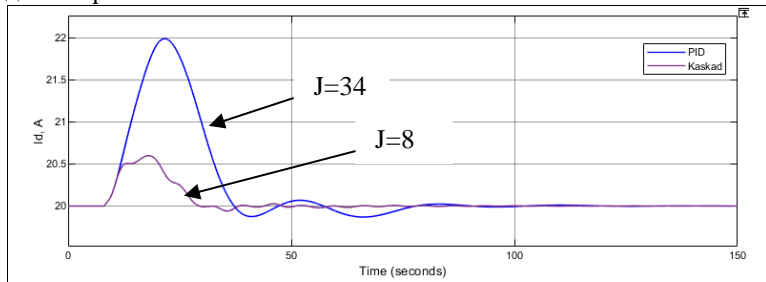


Рис. 3 Результати моделювання САР базової структури і каскадної САР
Fig. 3 Results of modeling of the basic structure of the ATS and the cascade ATS

Каскадна САР має значно кращі прями та інтегральні модульні показники якості J .

Доцільність моделювання каскадної САР обумовлена двома причинами. По-перше, це дозволяє знайти оптимальні налаштування регуляторів за допомогою підпрограми Matlab Response Optimazer (рис. 4).

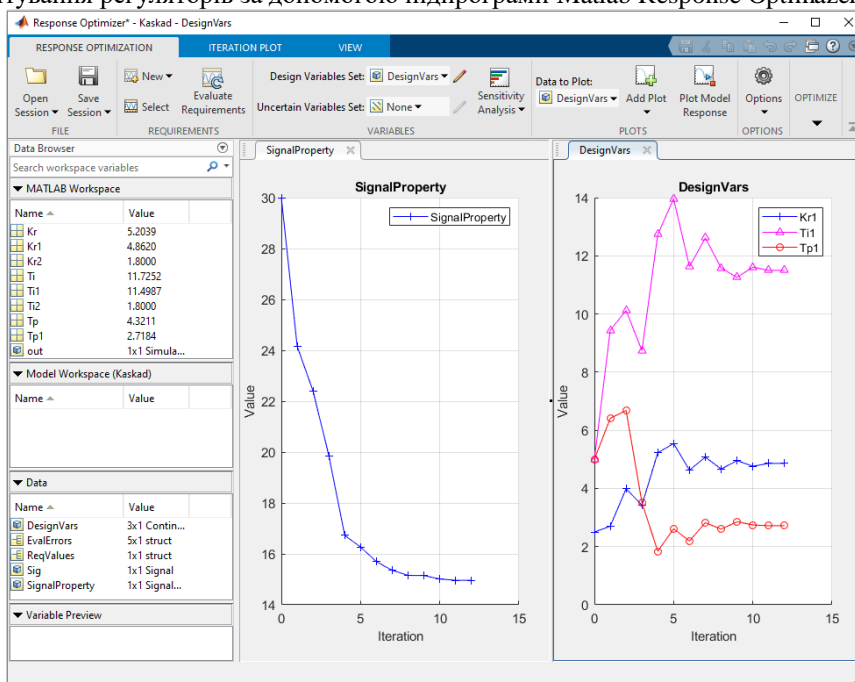


Рис.4 Приклад використання підпрограми Response Optimazer
Fig.4 Example of using the Response Optimazer subroutine

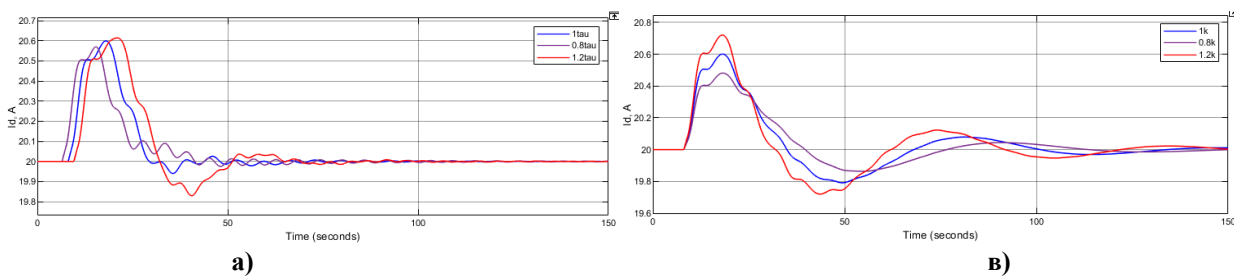


Рис. 5 Перевірка на «грубість» каскадної САР:
а) при зміні запізнення в моделі ОК $\pm 20\%$
в) при зміні коефіцієнта передачі в моделі ОК $\pm 20\%$
Fig. 5 Checking the “roughness” of the cascaded ATS:
a) when changing the delay in the OK model $\pm 20\%$
c) when changing the transmission coefficient in the OK model $\pm 20\%$

По-друге, можна перевірити «грубість» каскадної САР до можливих змін параметрів моделі об'єкта керування (ОК), наприклад, часу запізнення або коефіцієнта передачі в діапазоні $\pm 20\%$ відноминалу (рис. 5).



Обговорення результатів

Результати моделювання, наведені на рис. 5, дозволяють прийти до висновку, що оптимальні налаштування регуляторів можна використати при впровадженні каскадної САР на реальному об'єкті, оскільки ці налаштування «грубі» до можливих похибок у визначенні параметрів об'єкту або до змін параметрів у процесі експлуатації.



Рис. 6 Загальний вигляд розробленого млина в одному з фермерських господарств Одеської області
Fig. 6 General view of the developed mill in one of the farms of Odessa region

Порівняльне дослідження різноманітних технологій подрібнення за допомогою вальцевих верстатів, штифтових дезінтеграторів, ентолейторів, деташерів [5, 6] та інших показало, що використання запропонованого способу при однакових умовах дозволяє знизити питомі енергозатрати на помел, зменшити необхідну площу приміщення виробничої ділянки. Використання при цьому регульованої рециркуляції порошку (грубого помелу) дозволяє здобути весь, наприклад, гірчичний порошок заданої дисперсності помелу при практичній відсутності в ньому темних включень (що важливо при виготовленні гірчиці).

Висновки

Проведений комплексний аналіз технологічного процесу переробки олійних культур дозволив встановити, що етап подрібнення макухи є одним із найбільш енергоємних та складних з точки зору стабілізації якісних показників готової продукції. Оскільки фізико-механічні властивості сировини, такі як вологість та вміст залишкового жиру, мають виражений нестаціонарний характер, існуючі системи керування часто не забезпечують необхідної точності компенсації динамічних збурень. Запропонована у роботі вдосконалена конструктивна схема млина, що інтегрує механізми прецизійного регулювання робочих зазорів, створює необхідні умови для ефективного керування процесом деформації матеріалу з метою отримання цільового гранулометричного складу.

Розроблена математична модель системи автоматичного регулювання, реалізована в програмному середовищі Simulink, підтвердила високу ефективність застосування каскадної структури керування процесом помелу. Зокрема, функціонування внутрішнього контуру стабілізації струму навантаження головних електроприводів у поєднанні з зовнішнім контуром регулювання дисперсності дозволяє мінімізувати вплив коливань об'ємної подачі сировини на кінцевий результат. Отримані дані моделювання свідчать про можливість підвищення однорідності помелу та одночасного зниження питомих енерговитрат на 10–12% за рахунок оптимізації перехідних процесів у системі.

Таким чином, результати дослідження вказують на те, що впровадження дворівневої САР каскадної структури є обґрунтованим рішенням для модернізації промислового обладнання олійно-жирової галузі. Запропоновані підходи до автоматизації стабілізують технологічні режими роботи млина в умовах реального виробництва, що дозволяє рекомендувати їх до практичного застосування на підприємствах з переробки вторинної сировини та виробництва комбікормів для підвищення загальної техніко-економічної ефективності ліній подрібнення.



Список використаних джерел

- [1]. Муратов В.Г, Левінський В.М, Осипова Л.А, & Осипов В. Н. (2018). Автоматизація процесів переробки вторинної сировини виноробства. *Automation of Technological and Business Processes*, 10(4), 19-28. <https://doi.org/10.15673/atbp.v10i4.1227>
- [2]. Пат. на винахід №77864, Україна, МПК(2006) В02С 9/00, В02С 25/00. Спосіб автоматично керованого подрібнення макухи олійних культур та пристрій для його здійснення / Муратов В.Г. Заявник та патентовласник В.Г. Муратов – № а2005 04070; заявл. 28.04.2005; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.
- [3]. Пат. на винахід №83241, Україна, МПК(2006) В02С 25/00, В02С 9/00. Спосіб автоматично керованого подрібнення макухи олійних культур та пристрій для його здійснення / Муратов В.Г. Заявник та патентовласник В.Г. Муратов – № а2006 02205; заявл. 28.02.2006; опубл. 25.06.2008, Бюл. № 12.
- [4]. В.Г. Муратов Метрологія, технологічні вимірювання та прилади. Навч. посібник. Вид. 4-е. – Одеса, ОНТУ, 2025. – с.422. https://drive.google.com/file/d/1i5GsTkzNan5v4qId_mawdRnLbIJhNM8R/view?usp=sharing
- [5]. Шевчук В.В. Процеси і засоби подрібнення насіння олійних культур: монографія/ В.В. Шевчук, О.М. Сукач. – Львів: львівський національний аграрний університет, 2028. – 105 с.
- [6]. Технологія переробки зерна: курс лекцій / І.Д. Дудяк. – Миколаїв: МНАУ, 2014. -148 с.
- [7]. ДСТУ 4543-2006 Борошно соєве харчове. Технічні умови. – К.: Держстандарт України, 2007.

REFERENCES

- [1]. Muratov V.H, Levinskyi V.M, Osypova L.A, & Osypov V. N. (2018). Avtomatyzatsiia protsesiv pererobky vtorynnoi syrovyny vynorobstva. *Automation of Technological and Business Processes*, 10(4), 19-28. <https://doi.org/10.15673/atbp.v10i4.1227>
- [2]. Pat. na vynakhid №77864, Ukraina, МПК(2006) V02S 9/00, V02S 25/00. Sposib avtomatychno kerovanoho podribnennia makukhy oliinykh kultur ta prystrii dlia yoho zdiisnennia / Muratov V.G. Zaiavnyk ta patentovlasnyk V.G. Muratov – № а2005 04070; zaiavl. 28.04.2005; opubl. 15.01.2007, Biul. № 1.
- [3]. Pat. na vynakhid №83241, Ukraina, МПК(2006) V02S 25/00, V02S 9/00. Sposib avtomatychno kerovanoho podribnennia makukhy oliinykh kultur ta prystrii dlia yoho zdiisnennia / Muratov V.G. Zaiavnyk ta patentovlasnyk V.G. Muratov – № а2006 02205; zaiavl. 28.02.2006; opubl. 25.06.2008, Biul. № 12.
- [4]. V.G. Muratov Metrolohiia, tekhnolohichni vymiriuvannia ta prylady. Navch. posibnyk. Vyd. 4-ye. – Odesa, ONTU, 2025. – s.422. https://drive.google.com/file/d/1i5GsTkzNan5v4qId_mawdRnLbIJhNM8R/view?usp=sharing
- [5]. Shevchuk V.V. Protsesi i zasoby podribnennia nasinnia oliinykh kultur: monohrafiia/ V.V. Shevchuk, O.M. Sukach. – Lviv: lvivskiy natsionalnyi ahrarnyi universytet, 2028. – 105 s.
- [6]. Tekhnolohiia pererobky zerna: kurs lektsii / I.D. Dudiak. – Mykolaiv: MNAU, 2014. -148 s.
- [7]. DSTU 4543-2006 Boroshno soieve kharchove. Tekhnichni umovy. – K.: Derzhstandart Ukrainy, 2007.

Отримана в редакції 25.12.2025. Прийнята до друку 09.01.2026. Розміщено в інтернеті 30 березня 2026.
Received 25 December 2025. Approved 09 January 2026. Available in Internet 30 March 2026