

It was established that with a decrease in the rotation frequency of the screw and an increase in the rotation frequency of the casing and the angle of inclination of the screw mixer, the value of the coefficient of inhomogeneity of the mixing of three-component and two-component mixtures decreases. The maximum value of the coefficient of inhomogeneity of the three-component mixture of corn, buckwheat and millet grains was 11.28%, and the minimum value was 7.32%. The coefficient of inhomogeneity of mixing of a two-component mixture by a screw mixer with a rotating casing is 1.64 times smaller than the coefficient of inhomogeneity of mixing by a conventional screw conveyor with a spiral screw working body within the studied screw rotation frequencies from 250 rpm to 350 rpm.

mixing, screw conveyor, automated installation, coefficient of inhomogeneity of mixing, bulk material, grains, regression equation

Одержано (Received) 16.10.2024

Прорецензовано (Reviewed) 20.10.2024

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024

УДК 621.86

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.143-154](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.143-154)

І.Б. Гевко, проф., д-р техн. наук, **А.Є. Дячун**, доц., канд. техн. наук,

Р.М. Рогатинський, проф., д-р техн. наук, **Т.А. Довбуш**, доц., канд. техн. наук,

В.М. Бучинський, асп.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

e-mail: gevkoivan1@ukr.net

Синтез накопичувально-завантажувальних бункерів з елементами автоматизації

Проведено генерування ефективних конструкцій накопичувально-завантажувальних бункерних систем з елементами автоматизації на основі застосування структурно-схемного синтезу методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу. В результаті проведеного синтезу отримано 57 варіантів конструктивних рішень накопичувально-завантажувальних бункерів, схеми шести з них відображено на рисунках. Їх перевагами є здатність зміни об'єму накопичення, можливість збурення сипкого середовища і уникнення його заклинювання, забезпечення примусової інтенсивної подачі матеріалів при вивантаженні із бункерів, здатність розпушувати сипкі матеріали та забезпечувати рівномірне завантаження конвеєра. На одержані конструкції подано заявки на отримання патентів України. Розроблено схему автоматизованої адаптивної системи граничного керування гвинтовим конвеєром із накопичувально-завантажувальним бункером, яка забезпечує постійне значення заданих виробничих параметрів, зокрема продуктивності транспортування сипких матеріалів, потужності приводу шнека при дії різних зовнішніх факторів.

структурно-схемний синтез, накопичення, завантаження, бункер, елемент, гвинтовий конвеєр, автоматизація

Постановка проблеми. Накопичувально-завантажувальні системи, у тому числі бункери, мають широке застосування у сільському господарстві, будівельній, транспортній, фармацевтичній, харчовій і переробній та багатьох інших галузях економіки. Їх основним завданням є накопичення, зберігання і видача компонентів різноманітного структурного складу у необхідних кількостях із дотриманням санітарних, гігієнічних, техніко-економічних та інших вимог.

З метою створення різних типів накопичувально-завантажувальних бункерних системи з наступною їх оптимізацією для забезпечення відповідних вимог функціонування доцільно здійснити розроблення раціональних конструкцій при використанні методики структурно-схемного синтезу методом ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу. Використання даної методики проведення структурно-схемного синтезу дає змогу отримати обмежену кількість конструктивних рішень досліджуваних засобів з врахуванням градації вимог, які ставляться до них в процесі їх розробки, що дозволяє значно зекономити витрати часу та ресурсів на пошук ефективніших альтернатив.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробленням конструкцій накопичувально-завантажувальних бункерних систем та розрахунком їх параметрів займаються як окремі підприємства, так і наукові дослідники. Зокрема, у роботі [1] наведено систему вимірювання маси комбікорму в бункері дозатора із наявністю засобів для вимірювання, реєстрації та передачі інформації електричними сигналами, проте не додано можливості адаптації даної системи до зовнішніх впливів. Використання досвідного стенду для дослідження факторів, що впливають на характер протікання сипкого матеріалу у бункері та чисельної оцінки взаємозв'язку між параметрами сипких матеріалів та продуктивністю розглянуто у роботі [2]. Значного розширення можливостей вивчення процесів протікання сипких матеріалів надало застосування методу дискретних елементів (МДЕ) [3-8]. У роботі [3] за допомогою цього методу розглянуто моделювання процесу руху сипких матеріалів у циліндрично-конічному бункері.

У роботі [4] проведено моделювання переміщення дископодібних пружних частинок у бункері із зміною кутів нахилу стінок бункера та розмірів вивантажувальних отворів. Встановлено взаємозв'язок швидкості висипання матеріалу, виникнення склепіння матеріалу із параметрами матеріалу. У роботі [5] за допомогою МДЕ досліджено вплив кутів розміщення стінок бункера на ефект заклинювання матеріалу в бункері. У роботі [6] проведено чисельні експерименти на основі МДЕ для визначення продуктивності висипання еліпсоподібних частинок із циліндричного бункера та порівняння їх із фізичними експериментами. У роботі [7] приведено опис кінематичних та мікро механічних властивостей потоку сипкого матеріалу біля випускного отвору бункера на основі двох та трьох мірного моделювання. Робота [8] присвячена дослідженням потоку сипкого матеріалу у бункері із двома симетрично розміщеними випускними отворами, використовуючи велосиметрію зображення частинок та МДЕ. У роботі [9] експериментально проаналізовано вплив розміру частинок сипкого матеріалу на швидкість потоку при розвантаженні квазі-двохмірного бункера. У вказаних роботах визначаються при певних параметрах проблеми із забезпеченням постійності потоку витікання сипкого матеріалу, які можливо вирішити за рахунок внесення змін у конструкції існуючих бункерів як складової частини конвеєрів. Для цього можливе використання методів структурного та параметричного синтезу, які використовуються при генеруванні і розробленні прогресивних машинобудівних конструкцій, у тому числі і складових частин конвеєрних систем [10-12]. Також слід зазначити, що зростаючі потреби багатьох галузей економіки у використанні накопичувально-завантажувальних бункерних систем, особливо у сільському господарстві, будівництві, харчовій та переробній промисловості, фармації, зумовлюють зростаючі потреби у розробленні і дослідженні модернізованих конструкцій бункерних систем із високими санітарними, гігієнічними, техніко-економічними, безпековими та іншими вимогами. Відтак їх розроблення є актуальним завданням.

Постановка завдання. Метою завдання є генерування ефективних конструкцій накопичувально-завантажувальних бункерних систем з елементами автоматизації на основі застосування структурно-схемного синтезу методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу.

Виклад основного матеріалу. Потребу постійного вдосконалення накопичувально-завантажувальних бункерних систем здійснено за рахунок генерування їх конструктивних альтернатив на основі застосування структурно-схемного синтезу відомим методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу [11, 12].

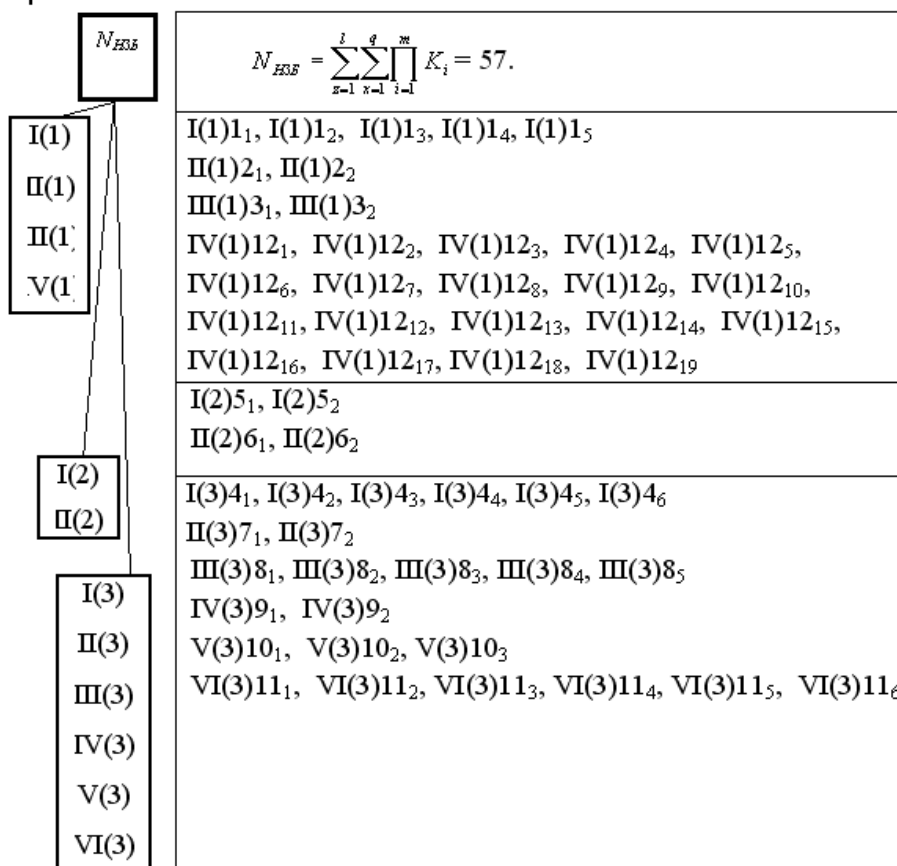
При здійсненні синтезу визначено конструктивні елементи бункера та їх ознаки, а також їх взаємозв'язки. Це забезпечило можливість побудови морфологічної таблиці цих конструктивних елементів та їх ознак (табл. 1), на основі чого створено модель механічної системи «Накопичувально-завантажувальний бункер» (рис. 1). При проведенні структурно-схемного синтезу бункерних систем вибрано такі базові конструктивні елементи та їх морфологічні ознаки: принцип вивантаження (входять п. 1 «активний» і п. 2 «пасивний»); п. 3 «механізм завантаження»; п. 4 «розташування відносно розвантажувального пристрою»; п. 5 «профіль»; п. 6 «об'єм»; п. 7 «ступінь рухомості»; п. 8 «матеріал покриття камери»; додаткові елементи (входять п. 9 «наявність», п. 10 «кількість», п. 11 «розташування» і п. 12 «профіль»).

Таблиця 1 – Морфологічна таблиця елементів та конструктивних ознак накопичувально-завантажувальних бункерів

Принцип вивантаження				
1. Активний		2. Пасивний		
1.1. З пневматичною подачею; 1.2. Гравітаційний з вібраційним струшуванням; 1.3. Гравітаційний з ручною механічною подачею; 1.4. Гравітаційний з механічною подачею від електропривода; 1.5. Гравітаційний із збуренням сипкого середовища додатковим елементом від привода.		2.1. Гравітаційний без розташування в середині бункера додаткових елементів; 2.2. Гравітаційний з розташуванням в середині бункера додаткових елементів.		
3. Механізм завантаження	4. Розташування відносно розвантажувального пристрою	5. Профіль	6. Об'єм	7. Ступінь рухомості
3.1. З регульованим завантаженням; 3.2. З нерегульованим завантаженням.	4.1. Співвісне перпендикулярне; 4.2. Бічне перпендикулярне; 4.3. Співвісне нахилене; 4.4. Бічне нахилене; 4.5. Співвісне паралельне; 4.6. Бічне паралельне.	5.1. Суцільний; 5.2. Секційний (для різних компонентів).	6.1. Постійний; 6.2. Змінний.	9.1. Один 9.2. Два
8. Матеріал покриття камери	Додаткові елементи			
	9. Наявність	10. Кількість	11. Розташування	12. Профіль
8.1. Сталь; 8.2. Пластик; 8.3. Гума; 8.4. Антисептичний; 8.5. Комбінований.	9.1. Використовуються; 9.2. Не використовуються.	10.1. Один; 10.2. Два; 10.3. Декілька.	11.1. Горизонтальне; 11.2. Вертикальне; 11.3. Нахилене; 11.4. Перехресне; 11.5. Змінне;	12.1. Трубка; 12.2. П-подібна ланка; 12.3. Л-подібна ланка; 12.4. М-подібна ланка; 12.5. Н-подібна ланка; 12.6. Трос; 12.7. Пружина розтягу-стиску; 12.8. Однонаправлена суцільна спіраль;

		11.6. Тимчасове.	12.9. Різнонаправлена суцільна спіраль; 12.10. Однонаправлена лопатева спіраль; 12.11. Різнонаправлена лопатева спіраль; 12.12. Однонаправлена комбінована спіраль; 12.13. Різнонаправлена комбінована спіраль; 12.14. Однонаправлена стрічкова спіраль; 12.15. Різнонаправлена стрічкова спіраль; 12.16. Випукла конічна втулка з гвинтовими елементами на верхній поверхні; 12.17. Опукла конічна втулка з гвинтовими елементами на верхній поверхні; 12.18. Комбінований елемент; 12.19. Розрихлювачі (штирі, кутники тощо).
--	--	---------------------	---

Джерело: розроблено авторами



I - VI – підгрупи ієрархічного рівня; (1) - (3) – відповідні ієрархічні рівні

Рисунок 1 - Модель механічної системи «Накопичувально-завантажувальний бункер»

Джерело: розроблено авторами

Кількість альтернатив визначено за формулою [11, 12]:

$$N = \sum_{z=1}^l \sum_{x=1}^q \prod_{i=1}^m K_i, \quad (1)$$

де z – ієрархічний рівень;

l – кількість ієрархічних рівнів;

x – певна підгрупа відповідного ієрархічного рівня;

q – кількість підгруп відповідного ієрархічного рівня;

K_i – альтернатива конструктивної ознаки елемента певної підгрупи відповідного ієрархічного рівня;

m – кількість альтернатив конструктивної ознаки елементів певної підгрупи відповідного ієрархічного рівня.

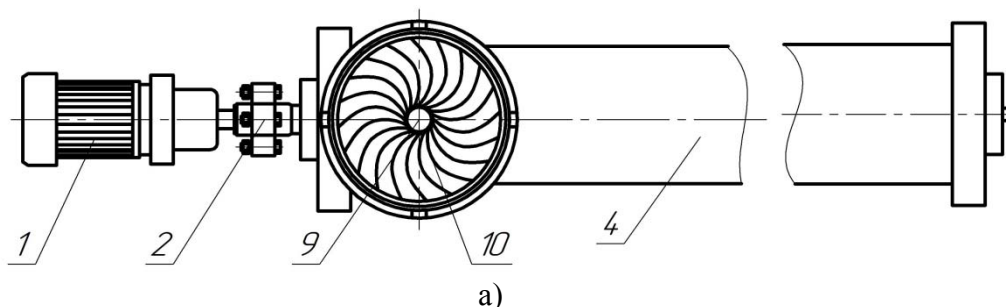
Загальна кількість генерованих варіантів накопичувально-завантажувальних бункерів при використанні методу синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу становитиме 57.

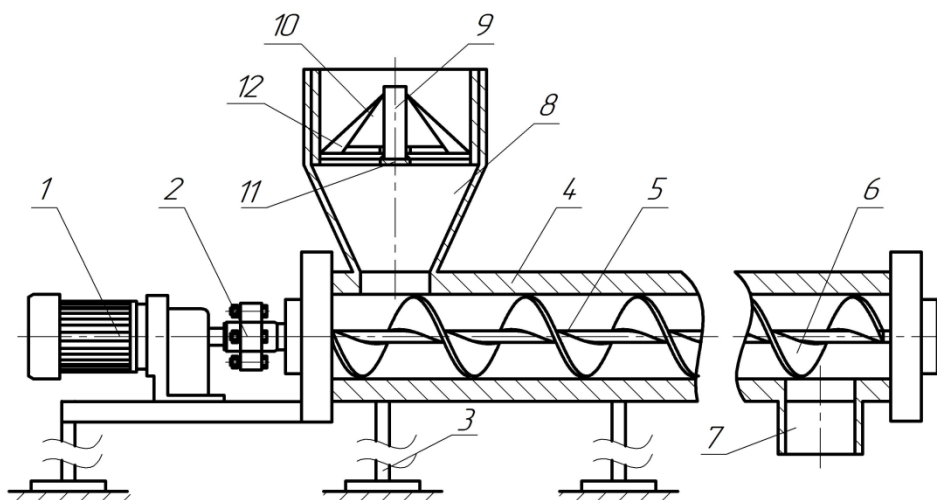
Найважливішим конструктивними ознаками та елементами в конструкціях накопичувально-завантажувальних бункерів за загальноприйнятими вимогами є принцип вивантаження, механізм регулювання вивантаження та профіль додаткових елементів (конструктивні ознаки 1 – 3 і 12 з табл. 1), а тому ми їх віднесли до першого ієрархічного рівня. Профіль, який може бути суцільний (для однокомпонентних чи готових змішаних продуктів) і секційний (для різних компонентів), а також об'єм бункера, що може бути постійний чи змінний (наприклад в розсувних бункерах), було віднесено до другого ієрархічного рівня.

Усі інші елементи та конструктивні ознаки накопичувально-завантажувальних бункерів, які приведені в табл. 1, були віднесені до третьої групи ієрархічного рівня, як ті, що мають найменше значення для них за загальноприйнятими вимогами.

Результатом проведеного синтезу є отримання значної кількості конструктивних рішень накопичувально-завантажувальних бункерів, схеми яких відображено на рис. 2 – рис. 6. Їх перевагами є здатність змінити об'єму накопичення, можливість збурення (розрихлення) середовища і уникнення «куполоутворень» (злежаності), забезпечення примусової інтенсивної подачі матеріалів при вивантаженні із бункерів.

Проведемо детальніший аналіз синтезованих конструкцій бункерів. На рис. 2 зображено гвинтовий змішувач з бункером рівномірного завантаження, у якому при розробленні бункера використано елементи та конструктивні ознаки 2.2, 3.2, 4.1, 5.1, 9.1, 10.1, 11.2, 12.16 з табл. 1. До переваг бункера належить здатність розпушувати сипкі матеріали та забезпечувати рівномірне завантаження конвеєра.





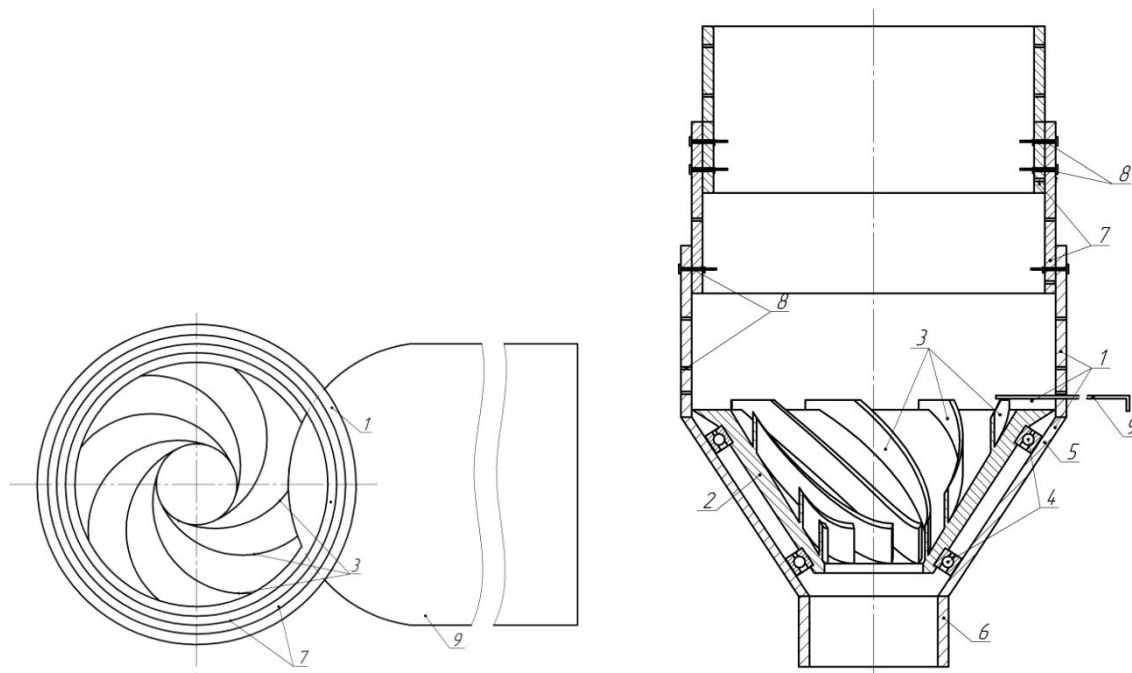
б)

1 - привід; 2 - муфта; 3 - опори; 4 - транспортна труба; 5 - вал; 6 - гвинтовий робочий орган;
7 - розвантажувальний патрубок; 8 - бункер; 9 - вісь; 10 - випукла конічна втулка; 11 - кронштейн;
12 - спіральні виступи

Рисунок 2 - Конструктивні схеми синтезованого бункера рівномірного завантаження:
а) вид зверху; б) вид збоку

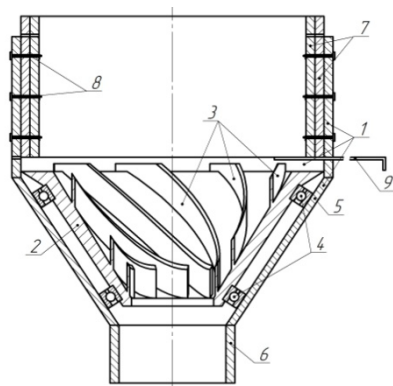
Джерело: розроблено авторами

На рис. 3 представлено бункер рівномірного регульованого розпушування і завантаження сипких матеріалів зі змінним об'ємом (телескопічний), у якому використано елементи та конструктивні ознаки 2.2, 3.1, 4.1, 5.1, 6.2, 9.1, 10.1, 11.2, 12.17 з табл. 1. До його переваг належить здатність зміни об'єму накопичення, можливість розпушування сипких матеріалів та забезпечення рівномірного та регульованого завантаження.



а)

б)



б)

1 - бункер; 2 - опукла конічна втулка; 3 - спіральні виступи; 4 - підшипники; 5 - внутрішня конічна частина бункера; 6 - вивантажувальний патрубок; 7 - розсувний завантажувальний накопичувач; 8 - фіксатори; 9 - шибер

Рисунок 3 - Конструктивні схеми синтезованого бункера рівномірного регульованого розпушування і завантаження сипких матеріалів зі змінним об'ємом:
а) вид зверху; б) у складеному вигляді; в) у розкладеному вигляді

Джерело: розроблено авторами

На рис. 4 зображено бункер рівномірного завантаження, у якому використано елементи та конструктивні ознаки 2.2, 3.2, 4.1, 5.1, 9.1, 10.1, 11.1, 12.8 з табл. 1. До його переваг належить здатність до розпушування сипких матеріалів.

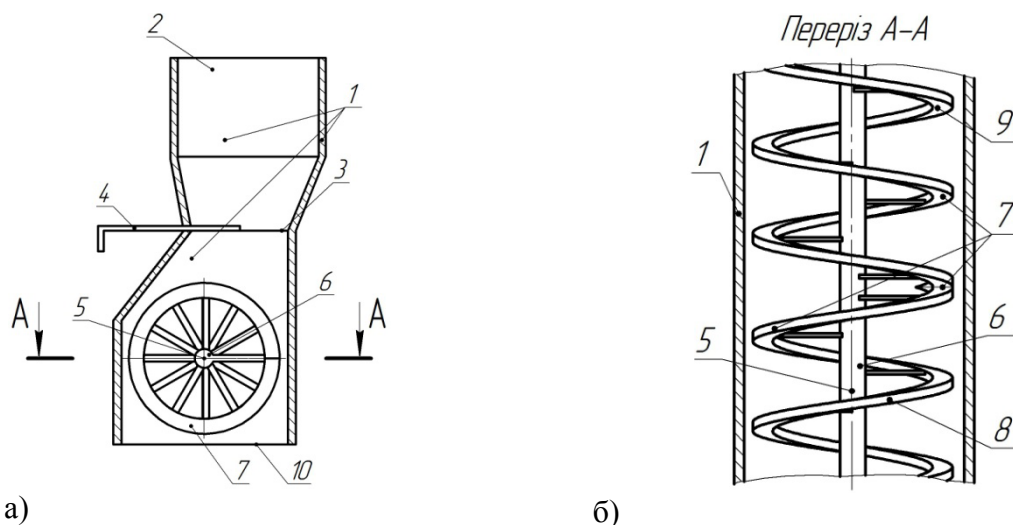
На рис. 5 і рис. 6 зображені бункери з додатковими елементами, зокрема П-подібною ланкою (рис. 5.а), тросом (рис. 5.б) і пружинами розтягу-стиску (рис. 6), які забезпечують збурення (розрихлення) середовища у бункері і уникнення його «куполоутворень» (злежаності).

Перевагою гвинтових конвеєрів із накопичувально-завантажувальними бункерами є те, що процес транспортування сипких матеріалів забезпечує високу продуктивність із простою автоматизацією, при цьому значна їх кількість може бути інтегрованою в автоматизовані системи управління, які забезпечують оптимізацію та підвищують ефективність виробничих процесів.

У розробленій схемі автоматизованої адаптивної системи граничного керування (рис. 7) гвинтовим конвеєром із накопичувально-завантажувальним бункером забезпечується постійне значення заданих виробничих параметрів, зокрема продуктивності транспортування сипких матеріалів, потужності приводу шнека при дії різних зовнішніх факторів (зміни вологості матеріалу, зміни подачі матеріалу із бункера, зношення шнека та інших).

Розроблена система адаптивного керування гвинтовим конвеєром із накопичувально-завантажувальним бункером за граничним критерієм працює таким чином: при зміні зовнішніх факторів (вологості та типу матеріалу, творення купола у

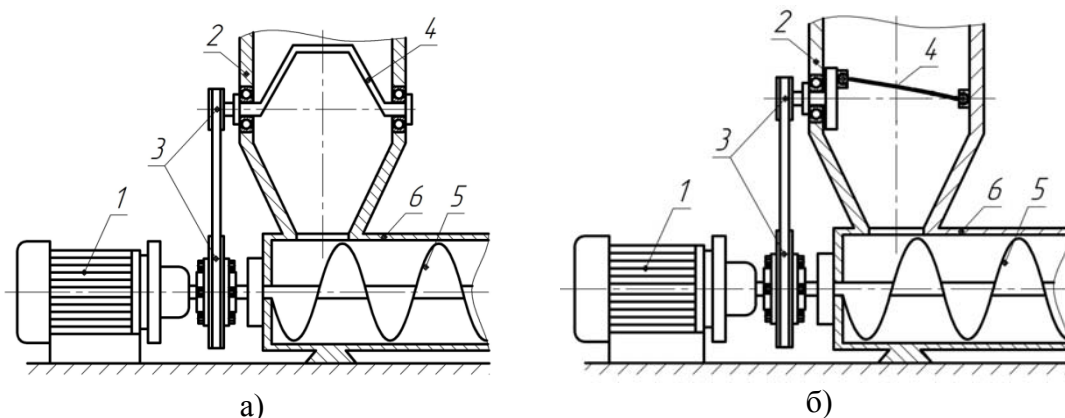
бункері, зношення шнека, заклинювання матеріалу у зазорі між шнеком та кожухом) система керування стабілізує задане граничне значення виробничих параметрів: продуктивності транспортування, потужності приводу шнека, вібрацій конвеєра, одержуючи від датчиків сигнали, що відповідають дійсному значенню цих параметрів.



1 - бункер; 2 - завантажувальний накопичувач; 3 - випускний отвір; 4 - шибер; 5 – вісь; 6 - втулка; 7 – спіральні виступи; 8 – лівосторонні спіральні виступ; 9 - правосторонні спіральні виступи

Рисунок 4 - Конструктивні схеми синтезованого бункера для змішування і розпушування сипких матеріалів: а) вид збоку; б) вид по А-А з виду збоку

Джерело: розроблено авторами



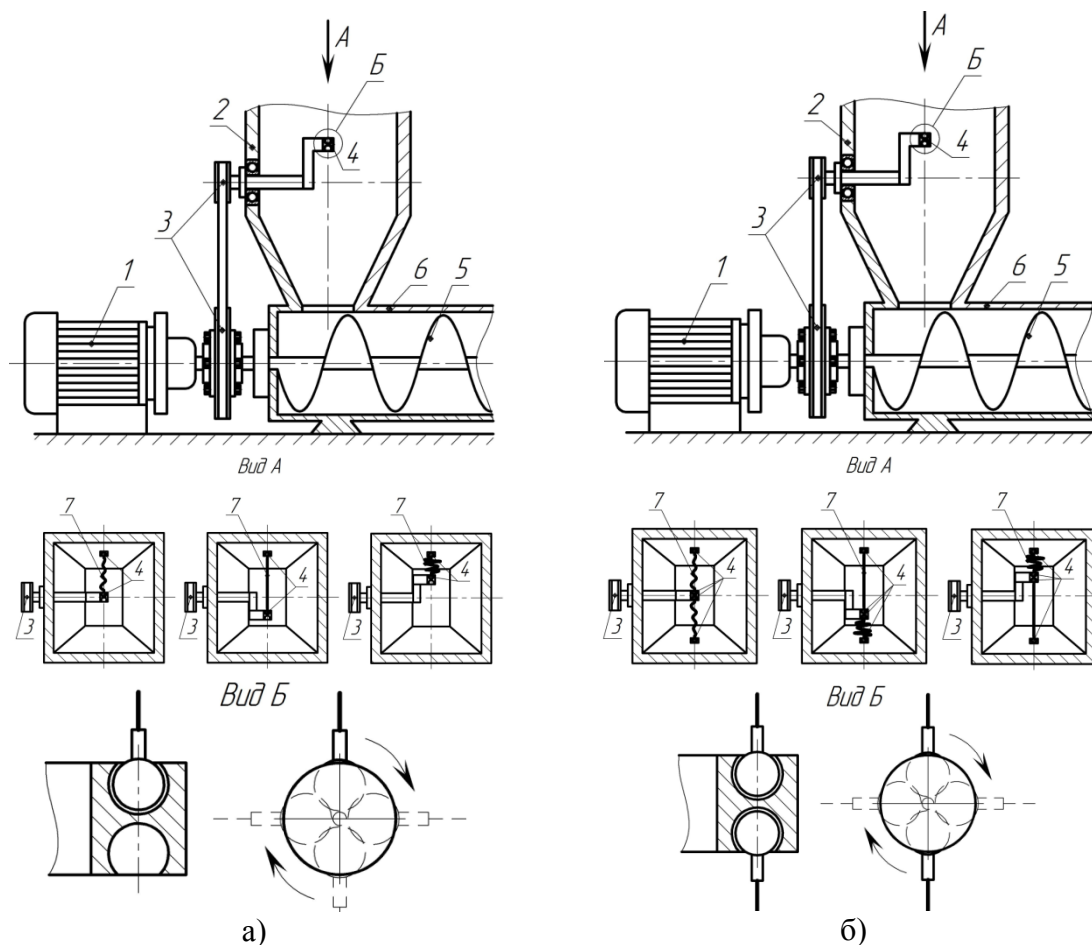
1 - привід; 2 - бункер; 3 - пасова передача; 4 - П-подібна ланка (а) і трос (б); 5 - гвинтовий робочий орган; 6 - транспортна труба

Рисунок 5 - Конструктивні схеми синтезованих бункерів з додатковими елементами: а) з П-подібною ланкою; б) з тросом

Джерело: розроблено авторами

Стабілізація заданих значень виробничих параметрів виконується відповідним збільшенням або зменшенням частоти обертання шнека n (на величину Δn), величини вивантажувального отвору бункера L переміщенням шибера (на величину ΔL), частоти обертання розпушувача n_1 (на величину Δn_1), в результаті цього одержуються скоректовані значення виробничих параметрів.

У розробленій узагальненій схемі (рис. 8), що відповідає схемі автоматизованої адаптивної системи граничного керування (рис. 7) автоматизовані бункери та конвеєри обладнані системами регулювання, що дозволяють змінювати продуктивність процесу транспортування матеріалів із заданою точністю.



1 - привід; 2 - бункер; 3 - пасова передача; 4 - кріпильні шарніри; 5 - гвинтовий робочий орган; 6 - транспортна труба; 7 - пружини розтягу-стиску

Рисунок 6 - Конструктивні схеми синтезованих бункерів з пружинами розтягу-стиску:

а) односторонньої дії; б) двосторонньої дії

Джерело: розроблено авторами



Рисунок 7 - Схема автоматизованої адаптивної системи граничного керування гвинтовим конвеєром із накопичувально-завантажувальним бункером

Джерело: розроблено авторами

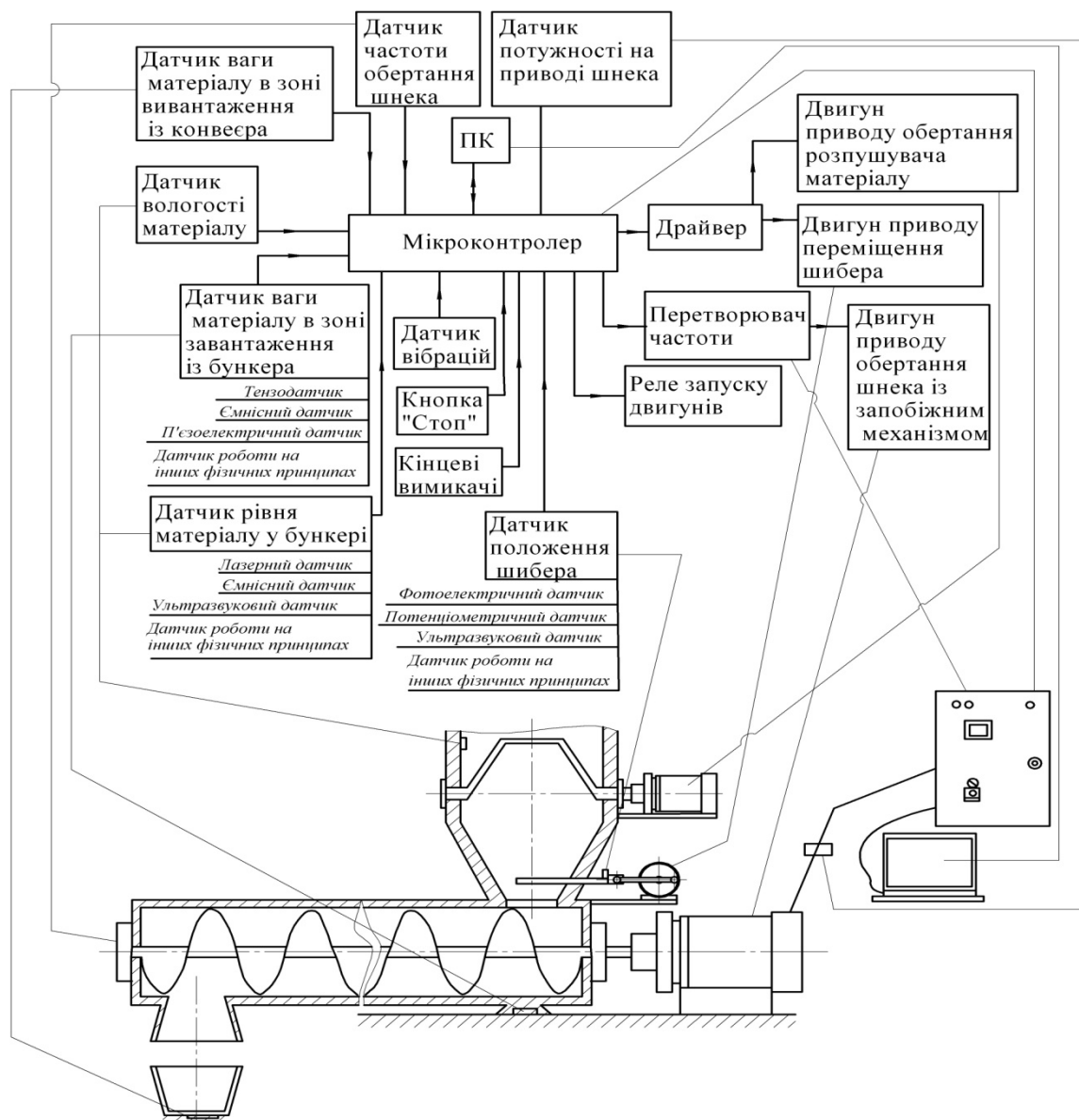


Рисунок 8 - Узагальнена схема автоматизованого бункера та конвеєра, що обладнані системами регулювання

Джерело: розроблено авторами

Управління такими системами здійснюється з персонального комп'ютера за допомогою мікроконтролера. Мікроконтролер виконує оброблення сигналів із різноманітних датчиків (рис. 8), кількість і необхідність яких визначається особливостями і завданнями виробничих процесів, зокрема датчиків ваги матеріалу, що переміщується, датчика рівня матеріалу у бункері, датчика вологості матеріалу, датчика положення шибера, датчика вібрацій, датчика частоти обертання шнека, датчика крутного моменту на шнекові або потужності його приводу. Також мікроконтролер здійснює керування електроприводами обертання шнека, переміщення шибера, обертання розпушувача.

Змінюючи кількість та склад елементів даної системи, можна генерувати різноманітні конструктивні схеми накопичувально-завантажувальних бункерів з елементами автоматизації.

Висновки: 1. Проведено генерування ефективних конструкцій накопичувально-

завантажувальних бункерних систем з елементами автоматизації на основі застосування структурно-схемного синтезу методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу. В результаті проведеного синтезу отримано 57 варіантів конструктивних рішень накопичувально-завантажувальних бункерів, схеми шести з них відображено на рисунках. Їх перевагами є здатність зміни об'єму накопичення, можливість збурення сипкого середовища і уникнення його заклинювання, забезпечення примусової інтенсивної подачі матеріалів при вивантаженні із бункерів, здатність розпушувати сипкі матеріали та забезпечувати рівномірне завантаження конвеєра. На одержані конструкції подано заявки на отримання патентів України.

2. Розроблено схему автоматизованої адаптивної системи граничного керування гвинтовим конвеєром із накопичувально-завантажувальним бункером, яка забезпечує постійне значення заданих виробничих параметрів, зокрема продуктивності транспортування сипких матеріалів, потужності приводу шнека при дії різних зовнішніх факторів. У розробленій узагальненій схемі автоматизовані бункери та конвеєри обладнані системами регулювання, що дозволяють змінювати продуктивність процесу транспортування матеріалів із заданою точністю. Змінюючи кількість та склад елементів даної системи, можна генерувати різноманітні конструктивні схеми накопичувально-завантажувальних бункерів з елементами автоматизації.

Список літератури

1. Банга В.І., Крупич О.М. Методика експериментальних досліджень вимірювача маси комбікорму в бункері дозатора. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2019. Вип. №14. С. 31-37.
2. Ничеглод В.В., Бурмістенков О.П., Стаценко В.В. Дослідження впливу форми бункера на характер протікання порошкових сипких матеріалів. *Технології та інжиніринг*. 2022. № 6 (11). С. 42-51.
3. Стаценко В.В., Бурмістенков О.П., Біла Т.Я. Дослідження характеру плинусипких матеріалів в бункерних пристроях методом дискретних елементів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2018. №6 (267). Т. 1. С. 7-14.
4. Kondic L. Simulations of two dimensional hopper flow. *Granular Matter*. 2014. 16. P. 235–242.
5. López-Rodríguez D., Gella D., To K., Maza D., Garcimartín A., Zuriguel I. Effect of hopper angle on granular clogging. *Physical review*. 2019. E 99. 032901.
6. Liu S.D., Zhou Z.Y., Zou R.P., Pinson D., Yu A.B. Flow characteristics and discharge rate of ellipsoidal particles in a flat bottom hopper. *Powder Technology*. 2014. 253. P. 70–79.
7. Rubio-Largo S.M., Janda A., Maza D., Zuriguel I., Hidalgo R.C. Disentangling the free-fall arch paradox in silo discharge. *Physical review letters*. 2015. 114. 238002.
8. Fullard L.A., Breard E.C.P., Davies C.E., Godfrey A.J.R., Fukuoka M., Wade A., Dufek J., Lube G. The dynamics of granular flow from a silo with two symmetric openings. *Proc. R. Soc.* 2019. A 475. 20180462.
9. Gella D., Maza D., Zuriguel I. Role of particle size in the kinematic properties of silo flow. *Physical review*. 2017. E 95. 052904.
10. Гевко І.Б., Дячун А.Є., Мельничук А.Л., Вар'ян А.Р., Кондратюк О.М. Стендове обладнання для дослідження модернізованих гвинтових конвеєрів. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. Рівне, 2016. Вип. 3 (75). С. 274-282.
11. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дячун А.Є., Вар'ян А.Р. Синтез гвинтових транспортно-технологічних механізмів з транспортуючими кожухами. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Харків, 2016. Вип. 168. С. 149-155.
12. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дячун А.Є., Вар'ян А.Р., Мельничук А.Л., Шуст І.М. Генерування конструкцій гвинтових механізмів методом морфологічного аналізу з ієрархічним групуванням. *Перспективні технології та прилади*. Луцьк, 2017. Вип. 10. С. 186-192.

References

1. Banha V.I. & Krupych O.M. (2019). Methodology of experimental studies of the feed mass meter in the dispenser hopper. *Prospective technologies and devices*, Lutsk, 14, 31-37 [in Ukrainian].

2. Nychehlo V.V., Burmistenkov O.P. & Statsenko V.V. (2022). Study of the influence of the shape of the hopper on the nature of the flow of powdery loose materials. *Technologies and engineering*, 6 (11), 42-51 [in Ukrainian].
3. Statsenko V.V., Burmistenkov O.P. & Bila T.Ia. (2018). Study of the nature of the flow of loose materials in hopper devices by the discrete elements method. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, 6 (267), 1, 7-14 [in Ukrainian].
4. Kondic L. (2014). Simulations of two dimensional hopper flow. *Granular Matter*, 16, 235–242.
5. López-Rodríguez D., Gella D., To K., Maza D., Garcimartín A. & Zuriguel I. (2019). Effect of hopper angle on granular clogging. *Physical review*, E 99, 032901.
6. Liu S.D., Zhou Z.Y., Zou R.P., Pinson D. & Yu A.B. (2014). Flow characteristics and discharge rate of ellipsoidal particles in a flat bottom hopper. *Powder Technology*, 253, P. 70–79.
7. Rubio-Largo S.M., Janda A., Maza D., Zuriguel I. & Hidalgo R.C. (2015). Disentangling the free-fall arch paradox in silo discharge. *Physical review letters*, 114, 238002.
8. Fullard L.A., Breard E.C.P., Davies C.E., Godfrey A.J.R., Fukuoka M., Wade A., Dufek J. & Lube G. (2019). The dynamics of granular flow from a silo with two symmetric openings. *Proc. R. Soc. A* 475, 20180462.
9. Gella D., Maza D. & Zuriguel I. (2017). Role of particle size in the kinematic properties of silo flow. *Physical review*, E 95, 052904.
10. Hevko I.B., Diachun A.Ie., Melnychuk A.L., Varian A.R. & Kondratiuk O.M. (2016). Bench equipment for the study of modernized screw conveyors. *Bulletin of the National University of Water Management and Nature Management*, Rivne, 3 (75), 274-282 [in Ukrainian].
11. Rohatynskyi R.M., Hevko I.B., Diachun A.Ie. & Varian A.R. (2016). Synthesis of screw transport and technological mechanisms with transport casings. *Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture*, Kharkiv, 168, 149-155 [in Ukrainian].
12. Rohatynskyi R.M., Hevko I.B., Diachun A.Ie., Varian A.R., Melnychuk A.L. & Shust I.M. (2017). Generation of structures of screw mechanisms by the method of morphological analysis with hierarchical grouping. *Prospective technologies and devices*, Lutsk, 10, 186-192 [in Ukrainian].

Ivan Hevko, Prof., DSc, **Andrii Diachun**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Roman Rohatynskyi**, Prof., DSc, **Taras Dovbush**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Buchynskyi**, post-graduate
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Synthesis of Storage and Loading Hoppers with Elements of Automation

The purpose of the article is to generate effective designs of storage and loading hopper systems with automation elements based on the application of structural-schematic synthesis by the method of hierarchical grouping using morphological analysis. The use of this method of carrying out structural-schematic synthesis makes it possible to obtain a limited number of design solutions for hoppers, taking into account the gradation of requirements that are applied to them in the process of their development. It allows to significantly save time and resources spent on the search for more effective alternatives.

The generation of efficient designs of storage-loading hopper systems with automation elements was carried out based on the application of structural-schematic synthesis by the method of hierarchical grouping with the help of morphological analysis. As a result of the conducted synthesis, 57 variants of design solutions of storage and loading hoppers were obtained, the schemes of six of them are shown in the figures. Their advantages are the ability to change the volume of accumulation, the possibility of disturbing the bulk medium and avoiding its jamming, ensuring the forced intensive supply of materials when unloading from hoppers, the ability to loosen bulk materials and ensure uniform loading of the conveyor.

A scheme of an automated adaptive limit control system for a screw conveyor with a storage-loading hopper has been developed, which provides a constant value of the given production parameters, in particular, the productivity of bulk materials transportation, the power of the screw drive under the influence of various external factors. By changing the number and composition of the elements of this system, it is possible to generate various design schemes of storage and loading hoppers with automation elements.

structural-schematic synthesis, accumulation, loading, hopper, element, screw conveyor, automation

Одержано (Received) 29.09.2024

Прорецензовано (Reviewed) 09.10.2024

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024