

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему

**Розроблення та дослідження системи управління електроприводом  
автоматизованого комплексу дозування аграрної продукції**

Виконав: студент 2 курсу, групи 601-мМЕ  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»

(цифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Гордієнко В.В. 

(прізвище та ініціали)

Керівник Кислиця С.Г. 

(прізвище та ініціали)


Рецензент Галай В.М. \_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
 Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та  
 робототехніки  
 Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій  
 Рівень вищої освіти Магістр  
 Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматики,  
 електроніки та телекомунікацій

  
 « 15 » 09 2025 р.  
 О.В. Шефер

## З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Гордієнку Василю Володимировичу

1. Тема проекту (роботи) «Розроблення та дослідження системи управління електроприводом автоматизованого комплексу дозування аграрної продукції»

керівник проекту (роботи) Кислиця Світлана Григорівна, к.т.н., доцент  
 затверджена наказом вищого навчального закладу від «03» 09 2025 року  
 № 1025-ф.а

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 22.12.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Технічна документація на шнековий дозатор. Номінальна напруга 380В, номінальна потужність двигуна 2,2 кВт, номінальна частота обертання 149 с<sup>-1</sup>, момент інерції двигуна  $J_{дв} = 0,0056 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Огляд систем і способів дозування і змішування компонентів комбікормів. Розроблення математичної імітаційної моделі елементів автоматизованого комплексу дозування компонентів комбікорму. Синтез управління асинхронним електроприводом в системі дозування. Способи управління частотно-регульованим електроприводом дозування. Оцінка стійкості системи.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):

- 1) актуальність, мета та задачі розроблення;
- 2) загальний вигляд дозатора;
- 3) схема кінематична дозатора;

- 4) структурна схема САК;
- 5) механічні характеристики;
- 6) математична модель електроприводу;
- 7) перехідні характеристики;
- 8) частотні характеристики;
- 9) висновки.

6. Дата видачі завдання 15.09.2025 р.

*КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН*

№	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Термін	Категорія	Обсяг	
1	Огляд систем і способів дозування і змішування компонентів комбікормів. Постановка задач на магістерську роботу	07.10.25		15%	Пл. 1
2	Розроблення математичної імітаційної моделі елементів автоматизованого комплексу дозування компонентів комбікорму	21.10.25	I	5%	Пл. 2
3	Синтез управління асинхронним електроприводом в системі дозування	04.11.25		40%	Пл. 3
4	Способи управління частотно-регульованим електроприводом дозування	11.11.25		50 %	Пл. 4
5	Розрахунок регульованих характеристик	18.11.25	II	60%	Пл. 5
6	Оцінка стійкості системи	25.11.25		70%	Пл. 6,7
7	Дослідження та аналіз розробленої системи	09.12.25		90%	Пл. 8,9
8	Оформлення пояснювальної записки	22.12.25	III	100%	Пл. 10

Магістрант  Гордієнко В.В.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи  Кислиця С.Г.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

## кваліфікаційної роботи

Розроблення та дослідження системи управління електроприводом автоматизованого комплексу дозування аграрної продукції

*Структура роботи.* Робота складається з вступу, трьох розділів, висновків і додатків; містить 88 стор. основного тексту, і бібліографічний список використаної літератури.

*Ключові слова:* шнековий дозатор, частотно-регульований електропривод, асинхронний двигун.

В магістерській роботі проведений аналіз відомих технічних рішень дозування, який показує, що найбільш доцільним для приготування кормосумішей є використання шнекових дозаторів, так як вони мають високу продуктивність і послідовно-порційне переміщення матеріалу в бункер-дозатор. Ці властивості дозволяють спрогнозувати масу падаючого стовпа матеріалу і досягти, таким чином, високої точності дозування.

Розроблено математичну і імітаційну моделі автоматизованого комплексу дозування з частотно-регульованим електроприводом шнека з урахуванням властивостей матеріалу, що змінюються і висоти «падаючого стовпа» в бункер дозатора. Запропоновано методику розрахунку коефіцієнта передачі шнекового дозатора. Аналіз процесу дозування на імітаційній моделі показав, що горизонтальне розташування шнекового дозатора, з точки зору продуктивності, є найбільш оптимальним. При дозуванні матеріалів з більшою насипною об'ємною масою спостерігається збільшення помилки дозування.

Розроблено алгоритм управління частотно-регульованим асинхронним електроприводом, що дозволяє дозувати із заданою точністю малі компоненти кормосуміші. Встановлено, що для зменшення помилки дозування в контур регулювання ваги необхідно ввести алгоритм корекції помилки на основі статистичних даних.

## ABSTRACT

master's thesis

Development and research of the electric drive control system of the automated dosing complex of agricultural products

*Structure of work.* The work consists of an introduction, three sections, conclusions and appendices; contains 88 pages. the main text, and a bibliographic list of the used literature.

*Keywords:* screw dispenser, frequency-regulated electric drive, asynchronous motor.

In the master's thesis, an analysis of known technical dosing solutions was carried out, which shows that the most expedient for the preparation of feed mixtures is the use of auger dispensers, as they have high productivity and sequential-portion movement of material into the hopper-doser. These properties make it possible to predict the mass of the falling column of material and thus achieve high dosing accuracy.

A mathematical and simulation model of an automated dosing complex with a frequency-regulated electric auger drive was developed, taking into account the changing properties of the material and the height of the "falling column" into the dispenser hopper. A method of calculating the transmission coefficient of the screw dispenser is proposed. Analysis of the dosing process on a simulation model showed that the horizontal arrangement of the screw dispenser is the most optimal from the point of view of productivity.

When dosing materials with a larger bulk volumetric mass, an increase in the dosing error is observed. An algorithm for controlling a frequency-regulated asynchronous electric drive has been developed, which allows dosing small components of the feed mixture with a given accuracy. It was established that to reduce the dosing error in the weight control circuit, it is necessary to introduce an error correction algorithm based on statistical data.

## ЗМІСТ

	Стор
ВСТУП.....	7
1. ОГЛЯД СИСТЕМ І СПОСОБІВ ДОЗУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ.....	9
1.1 Класифікація пристроїв дозування сипких матеріалів і способів дозування.....	9
1.2 Структури автоматизованих комплексів багатокомпонентного дозування сипких матеріалів.....	20
1.3 Автоматизований комплекс дозування і змішування компонентів комбікормів.....	23
2. МАТЕМАТИЧНІ ТА ІМІТАЦІЙНІ МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ ДОЗУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ.....	31
2.1. Математичний опис асинхронного двигуна з частотним перетворювачем.....	32
2.2. Визначення коефіцієнта передачі шнекового дозатора.....	42
2.3. Математична модель шнекового дозатора із змінними характеристиками сипучого середовища.....	44
2.4. Модель падаючого стовпа сипких матеріалів.....	54
2.5. Імітаційна модель електромеханічної системи дозування сипких матеріалів.....	57
3. СИНТЕЗ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ В СИСТЕМІ ДОЗУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ.....	62
3.1 Способи управління частотно-регульованим електроприводом дозування сипких матеріалів.....	62
3.2 Методика синтезу цифрового регулятора ваги в електромеханічній системі.....	65
3.3 Синтез регулятора ваги на основі модульного оптимуму.....	68
3.4 Алгоритм формування завдання електроприводу в системі дозування сипких матеріалів.....	70
3.5 Алгоритм корекції помилки, викликаной масою «падаючого стовпа» матеріалу.....	74
3.6 Методика проектування систем багатокомпонентного дозування.....	79
ВИСНОВКИ.....	84
ЛІТЕРАТУРА.....	85

## ВСТУП

Актуальність теми. Автоматичні системи дозування сипких матеріалів широко застосовуються в будівельних, харчових і фармацевтичних галузях промисловості для приготування різних сумішей. Головний критерій оптимізації подібних систем є точність дозування кожного компонента суміші, яка безпосередньо залежить від швидкості руху дозуемого компонента і інших технологічних факторів. Технологічні вимоги до якості продукції на виробництві, жорстко регламентують розробникам автоматизованої системи величину помилки дозування сипких матеріалів, що пов'язано також з високою вартістю окремих компонентів суміші. Забезпечення максимально можливого дотримання рецепта суміші вимагає дозування кожного її компонента з високою точністю, що є непростим інженерно-технічним завданням.

З усього різноманіття електротехнічних комплексів дозування сипких матеріалів, слід виділити автоматизовані системи, побудовані на базі сучасного асинхронного електроприводу з мікроконтролерним управлінням вагодозуючим пристроєм, що використовують принцип багатоконпонентного дозування.

Точність дозування в автоматизованих системах є функцією великого числа систематичних і випадкових чинників: величини, форми і взаємного розташування окремих частинок матеріалу; коефіцієнта зчеплення їх один з одним і з конструктивними елементами дозатора; відносної вологості дозуемого матеріалу і повітря в приміщенні; висоти падіння матеріалу в приймальну ємність; величини нахилу дозатора до рівня горизонту; вібраційних і електромеханічних перешкод і т.ін.

Особливого значення набуває завдання підвищення ефективності управління автоматизованим електротехнічним комплексом дозування сипких матеріалів, так як її рішення дозволить істотно збільшити його продуктивність і знизити неправильне дозування особливо відповідальних, невеликих за обсягом, але дорогих компонентів. Необхідна в сучасних умовах якість

пред'являє високі вимоги до складу кожного компонента кормосуміші і до виконання рецепта кінцевого продукту з необхідною точністю. Таким чином, розробка і дослідження електротехнічного комплексу автоматизованого вагового дозування сипких матеріалів з частотно-регульованим електроприводом, що забезпечує підвищену точність дозування при максимальній продуктивності, є актуальним завданням і дозволить забезпечити виконання підвищених вимог до технологічного процесу дозування сумішей компонентів комбікормів в складних виробничих умовах.

Мета роботи. Забезпечення заданих точності і продуктивності автоматизованого електротехнічного комплексу вагового дозування сипких матеріалів шляхом застосування ефективних алгоритмів управління частотно-регульованим асинхронним електроприводом шнекових дозаторів.

Для досягнення зазначеної мети вирішені наступні завдання:

- аналіз пристроїв дозування сипких матеріалів і способів управління частотно-регульованим електроприводом шнекового дозатора;
- побудова узагальненої математичної і імітаційної моделей електроприводу шнекового дозатора комплексу дозування сипких матеріалів;
- розроблення алгоритмів керування частотно-регульованим асинхронним електроприводом шнекового дозатора в умовах нестабільності параметрів сипкого матеріалу;
- імітаційне моделювання та експериментальні дослідження розроблених алгоритмів керування електроприводом шнекових дозаторів.

# 1. ОГЛЯД СИСТЕМ І СПОСОБІВ ДОЗУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

## 1.1 Класифікація пристроїв дозування сипких матеріалів і способів дозування

Сучасний розвиток обладнання в сфері приготування комбікормів ставить завдання організувати процес виробництва з меншою кількістю одиниць обладнання, меншою протяжністю транспортних ліній і, відповідно, зниження енергоспоживання. Також обов'язковою умовою є висока якість продукції, що випускається, експлуатаційна надійність обладнання при зростаючому рівні його автоматизації та забезпечення безпеки виробництва та комфортних умов праці для персоналу.

Якість кінцевого продукту в першу чергу залежить від точності дозування компонентів кормових сумішей. Сипучі матеріали дуже важко точно дозувати вручну, тому на виробництвах застосовуються різні типи дозаторів.

До теперішнього часу розроблено безліч конструкцій дозуючих пристроїв. Це пов'язано з тим, що матеріалопоток має широкий діапазон фізико-механічних і технологічних характеристик; крім того, до обладнання часто ставляться специфічні вимоги залежно від особливостей процесу.

Класифікацію типів дозаторів можна провести за трьома ознаками (рис.1.1):

- за структурою роботи циклу;
- за конструктивними ознаками;
- за принципом роботи.

За структурою робочого циклу можна виділити дозатори безперервної дії і дозатори дискретної дії.

Дозатори вагові неперервної дії (ВБД) призначені для автоматичного відтворення заданих значень маси сипучих матеріалів в одиницю часу (продуктивності), що транспортуються конвеєром, які надходять з

приймальної воронки в технічних потоках різних галузей промисловості, сільського господарства і торгівлі.



Рисунок 1.1 – Класифікація пристроїв дозування

Принцип дії дозатора заснований на перетворенні деформації пружних елементів ваговимірювальних тензорезисторних датчиків, що виникає під дією сили тяжіння вантажу, в аналоговий електричний сигнал, що змінюється пропорційно масі вантажу, а також на перетворенні лінійної швидкості транспортної стрічки в пропорційний їй частотний сигнал. Далі аналоговий електричний сигнал з ваговимірювальних датчиків і датчика швидкості надходить в ваговимірювальний прилад. Значення продуктивності дозатора, швидкості стрічки і сумарної маси продукту індукуються на ваговимірювальному приладі, на передній панелі якого розміщена клавіатура управління.

Дискретні дозатори подають матеріал рівними порціями через задані проміжки часу. В даному випадку контролювати кількість дозуемого матеріалу можна шляхом регулювання кількості порцій в одиницю часу або обсягу самої порції. Цей тип дозаторів є менш точним, але має такі переваги, як простота обслуговування і надійність при роботі у важких умовах.

В основному розрізняються три види дозування:

- об'ємне;
- вагове;
- масове.

Об'ємні дозатори. Пристрої цього типу призначені для роботи з рідкими (іноді газоподібними) речовинами. Даний тип дозаторів зручний в експлуатації, довговічний і надійний, проте має недостатню точність вимірювань при роботі з деякими видами продукції [9].

Вагові дозатори. Оптимальне рішення для дозування сипких матеріалів з фракціями будь-яких розмірів, а також рідин. Популярність цих пристроїв пояснюється їх універсальністю, оптимальної точністю і великою продуктивністю. Тензометричні ваговимірювальні пристрої, оснащені дозаторами цього типу, надзвичайно зручні в експлуатації – процеси зважування і дозування повністю автоматизовані, управління вагами зводиться до маніпулювання пристроєм завантаження. Єдиним недоліком вагових дозаторів є порівняно низька швидкість їх роботи [9].

Масові дозатори. Ці дозатори можуть однаково успішно застосовуватися для роботи з твердими, сипучими і в'язкими речовинами. Вони знаходять собі застосування в самих різних галузях промисловості. Масові дозатори поєднують в собі надійність, точність вимірювань і відносно високу швидкість роботи [9].

Класифікація дозуючих пристроїв за конструктивними ознаками є найбільшою. Найбільш суттєвою в цьому випадку є класифікація по виду руху і типу робочих органів дозувальних пристроїв.

На класифікацію дозуючого обладнання за конструктивними ознаками великий вплив мають фізико-механічні властивості матеріалу. В першу чергу це: розмір часток, насипна щільність, плинність, адгезія.

Середній розмір частинок сипких матеріалів класифікується наступним чином:

- кускові ( $d > 10$  мм);
- грубозернисті ( $d = 2 \dots 10$  мм);
- дрібнозернисті ( $d = 0,5 \dots 2,0$  мм);
- порошкоподібні ( $d = 0,05 \dots 0,50$  мм);
- пилоподібні ( $d < 0,05$  мм).

Для дозаторів, що застосовуються в процесі приготування комбікормів, характерна робота з кусковими, грубозернистими, дрібнозернистими матеріалами. Також важливим фактором при виборі дозатора є плинність матеріалу. Вона залежить від гранулометричного складу, форми і розміру часток, коефіцієнта внутрішнього тертя, вологості. Плинність сипучих матеріалів визначає багато конструктивних особливостей дозуючих пристроїв. Вона впливає на тривалість операції заповнення і спорожнення змішувачів.

Наступний критерій, який впливає на класифікацію дозаторів за конструктивним принципом – це насипна щільність. Даний параметр залежить від розміру матеріалопотоку частинок, який їх складає, їх середньої щільності, вологості, щільності укладки частинок в шарі. Щільність не залишається постійною навіть при спокої сипучого матеріалу. Під впливом вібрацій стінок посудини сипучий матеріал з часом ущільнюється, і його насипна щільність досягає деякого граничного значення. У процесі руху, переміщення, змішання, навпаки, відбувається розпушення матеріалу. Насипна щільність при цьому зменшується, наближаючись до граничного значення. За величиною насипної щільності розрізняють сипучі матеріали:

- легкі (до  $600 \text{ кг / м}^3$ ),

- середні (600 ... 1100 кг / м<sup>3</sup>),
- важкі (1100 ... 2000 кг / м<sup>3</sup>),
- досить важкі (більше 2000 кг / м<sup>3</sup>).

При дозуванні кормових сумішей насипна щільність відповідає значенню для середніх і легких сипучих матеріалів [4].

### **1.1.1. Дозатори без рухомого робочого органу**

До дозаторів даного типу відносять гравітаційні і пневматичні дозатори, які служать для фасування легкосипких продуктів: крупнозернистих, дрібнозернистих матеріалів, насіння, зерна, бакалії, піску, цукру, пелет, гранул, щебню, гальки, сухих сумішей в мішки вагою будь-якого діапазону.

В окремому випадку пневматичний дозатор (рис. 1.2) містить резервуар 1 з верхньої камерою 2, в нижній або донній частині якої встановлено псевдозріджуючий пристрій у формі псевдоозріджуючої стінки 3 з «парусини», і з нижньою камерою, яка з'єднується через трубу 5 з джерелом повітря [5]. Резервуар забезпечений впускним отвором 6 для подачі порошкоподібного матеріалу з завантажувальної воронки 8 в верхню камеру 2 і випускним отвором 7 для розвантаження камери 2. Між завантажувальною воронкою 8 і резервуаром 1 утворений, щонайменше один псевдозріджуючий канал 9, забезпечений псевдозріджуючою стінкою або псевдозріджуючою «парусиною» 11, яка з'єднується з джерелом подачі повітря через трубу 12. Заповнення і спорожнення камери 2 здійснюється за допомогою соленоїдних клапанів 13, 14, які розташовуються в трубі 3 для резервуару 1 і в трубі 12 для каналу 9 відповідно. Режим роботи клапанів регулюється за допомогою регулятора PLS або процесора таким чином, щоб повітря подавалося в канал 9 і резервуар 1 відповідно за кращою програмою щодо тривалості та частоти.

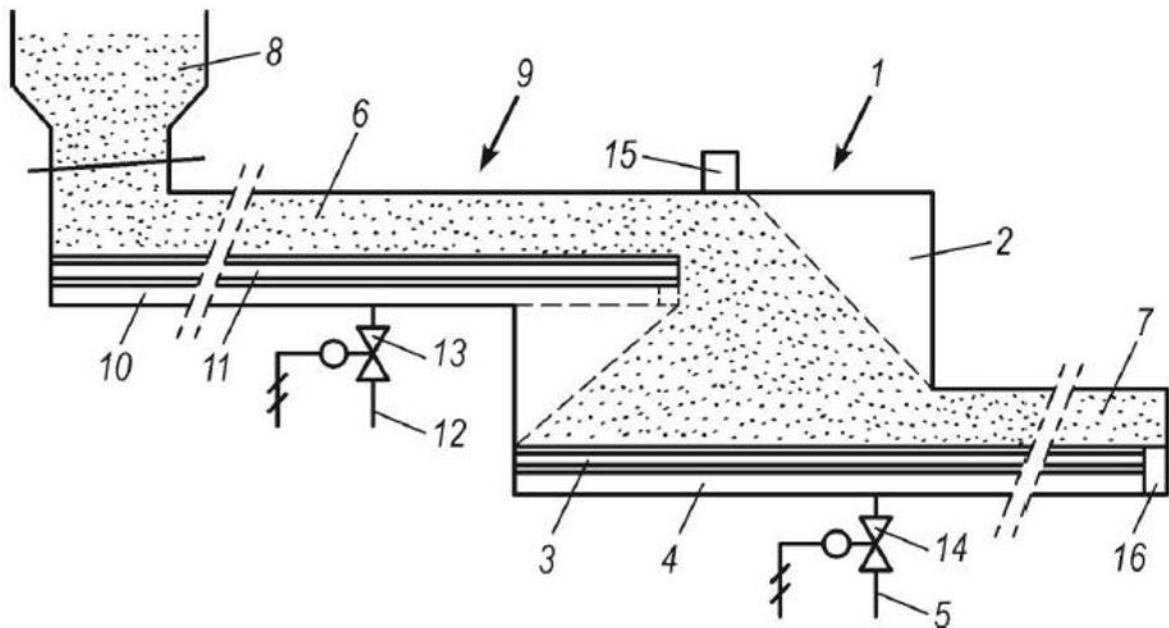


Рисунок 1.2 – Схема пневматичного дозатора

Принцип дії пневматичних дозаторів наступний: подача повітря в канал 9 і в резервуар 1 перекривається. Що знаходиться в живильному резервуарі 8 порошкоподібний матеріал вільно проходить в канал і заповнює його частково. Після спрацювання соленоїдного клапана 14 повітря подається в камеру 10 в каналі 9. За рахунок цього матеріал псевдозріджується і тече в камеру 2 в резервуарі 1. Після заповнення камери 2, як це і показано, плиння матеріалу припиняється, причому це вірно і для випадку, коли буде підтримуватися подача повітря в канал.

Після заповнення камери 2 і перекриття соленоїдного клапана 14 спрацьовує соленоїдний клапан 13, щоб забезпечити подачу повітря в камеру 4 в резервуарі 1. В цей момент матеріал, що знаходиться в камері 2, буде псевдозріджуватися, а сама камера 2 спорожниться. Відразу ж після спорожнення камери 2 соленоїдний клапан 13 вимикається, і припиняється подача повітря в камеру 2. До цього моменту завершено цикл заповнення/спорожнення, і можна починати новий цикл [5].

### 1.1.2. Дозатор з поступальним рухом робочого органу

До даного типу дозаторів відносять стрічкові і пластинчасті дозатори, що працюють для подачі сухих сипучих, мелених і кускових матеріалів.

У загальному випадку дане обладнання являє собою нескінченну транспортну стрічку (ланцюг – в разі пластинчастого дозатора), натягнуту між двома обертовими барабанами (рис. 1.3). Подібні дозатори дозволяють організувати безперервну подачу матеріалу для потреб технологічного процесу.

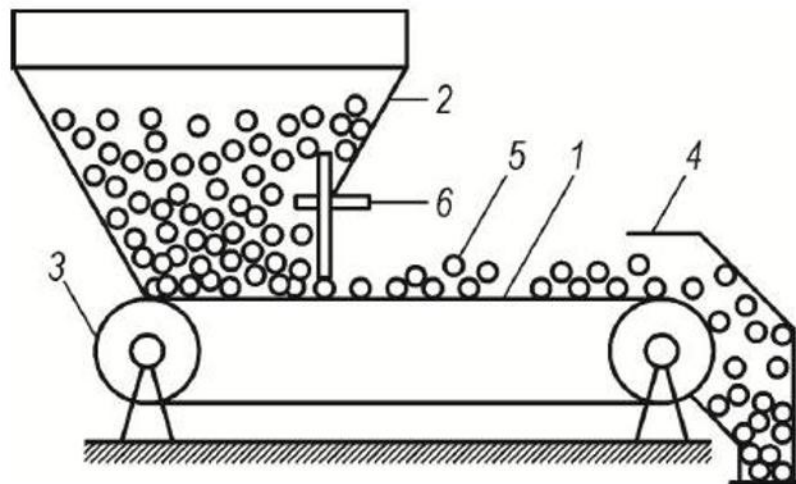


Рисунок 1.3 – Дозатор з поступальним рухом робочого органу

Дозатор працює наступним чином: транспортуюча стрічка 1 розташовується під воронкою приймального бункера 2 так, щоб між конвеєром і бункером залишався необхідний для проходу потрібної кількості матеріалу зазор. Транспортна стрічка приводиться в рух барабаном 3 і зсипає матеріал по лотку 4.

Продуктивність даного типу дозаторів регулюється шляхом зміни швидкості обертання ведучого барабана або величини шару, що знаходиться на транспортуючій стрічці. Для формування потрібної висоти шару дозуємого матеріалу використовується шиберна заслінка [6].

### 1.1.3. Дозатор з обертовим рухом робочого органу. Барабанні дозатори

Барабанний дозатор з лопатевою насадкою (рис. 1.4) використовується для порціонної і безперервної подачі порошкоподібних матеріалів [6]. При обертанні барабана-накопичувача матеріал захоплюється лопатями, піднімається вгору і зсипається в приймальний лоток. За один оборот барабана з кожної лопаті зсипається певний обсяг матеріалу.

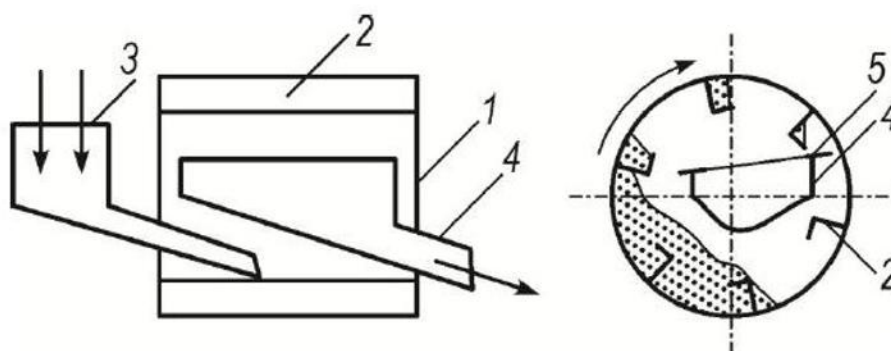


Рисунок 1.4 – Барабанний дозатор з лопатевою насадкою

Число лопатей, конструкція кришки приймального лотка і його положення можуть бути підбрані так, щоб в лоток одночасно зсипався матеріал тільки з однієї лопаті (порційна подача) або з двох (безперервна подача).

Шнекові дозатори. У загальному випадку подібні дозатори представляють собою шнек, укладений в кожух, і використовуються для подачі таких матеріалів, як порошки, зерністі матеріали, вміст яких не потребує подрібнення (рис. 1.5). Робочий орган цього типу може розташовуватися вертикально, горизонтально або похило. На практиці також зустрічаються дозатори з декількома шнеками. З метою підтримки однорідності потоку використовуються шнеки зі змінним кроком, який зменшується в сторону розвантаження. У тих випадках, коли існує ймовірність

опресування матеріалу у внутрішньому просторі дозатора, застосовуються шнеки зі збільшенням кроку у напрямку руху.

Принцип дії шнекового вагового дозатора (рис. 1.5). Чотиришнековий дозатор 1 забирає сипучий матеріал з бункера і направляє його в витратомір 2. Швидкість обертання шнеків можна плавно змінювати за допомогою керованого приводу, який складається з асинхронного мотор-редуктора 3 і перетворювача частоти 4. Потік матеріалу потрапляє в витратомір і ковзає вниз по лотку 5, прикріпленому до тензодатчиками 6. Електричний сигнал з тензодатчика, пропорційний вазі матеріалу на лотку, надходить в мікроконтролер 7, що обчислює продуктивність потоку.

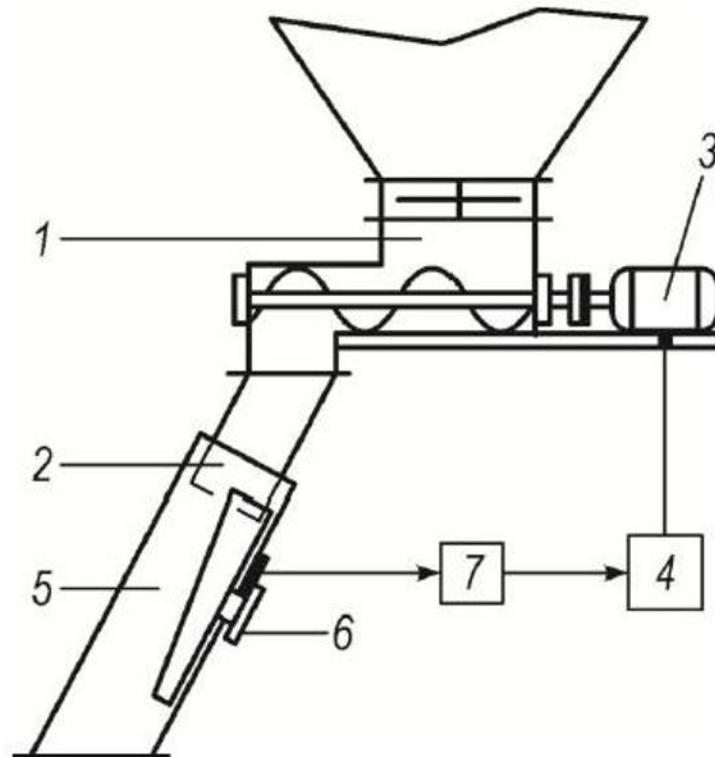


Рисунок 1.5 – Принципова схема шнекового вагового дозатора

Виміряна продуктивність дозатора безперервно порівнюється із заданою за рецептом, і при виявленні відмінностей через перетворювач частоти проводиться постійна корекція швидкості обертання шнеків.

Зазвичай похибка дозування не перевищує 0,5% від минулої через дозатор маси матеріалу [7].

### 1.1.4. Дозатори з вібраційним рухом робочого органу

До подібних дозаторів можна віднести лоткові, або, як їх ще називають, дозатори, що коливаються, використовуються в основному для дозування кускових матеріалів. У конструктивному відношенні коливальні дозатори можна розділити на підвісні і кареточні.

Підвісні коливальні дозатори використовуються для подачі матеріалу з насипною щільністю до  $1 \text{ т} / \text{м}^3$ .

Кареточні коливальні дозатори служать для рівномірної подачі різних матеріалів, включаючи крупнокускові. Дозатори працюють за принципом поступально-зворотних симетричних коливань з прямолінійною траєкторією.

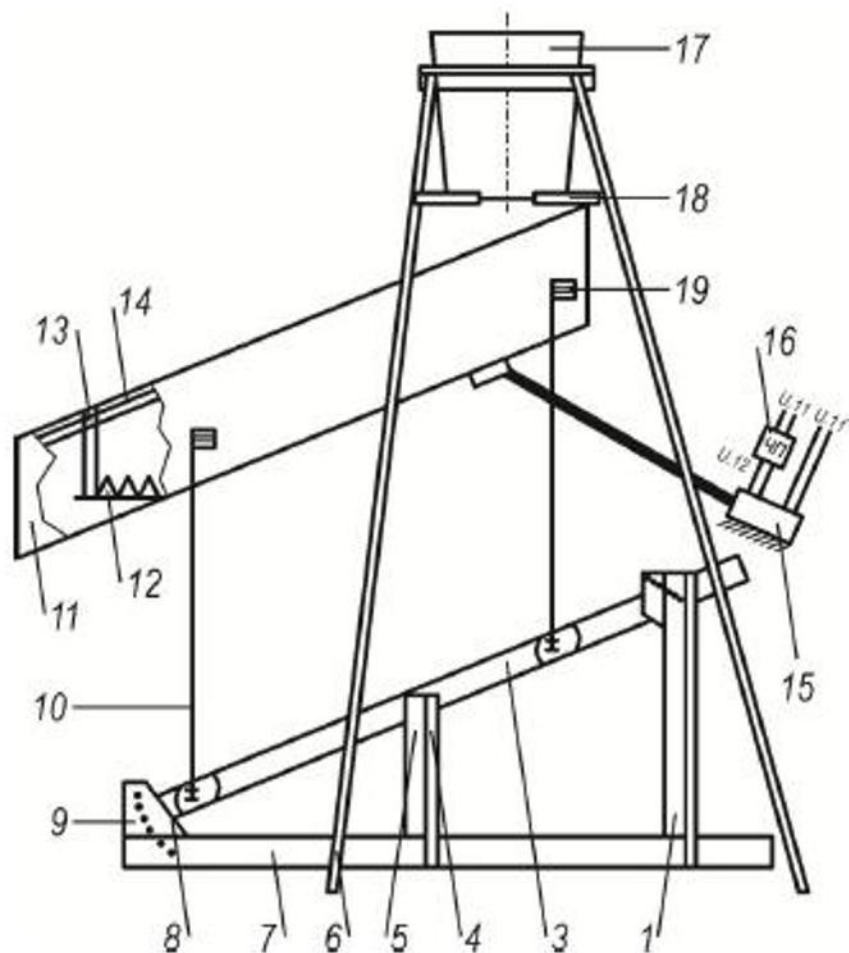


Рисунок 1.6 – Вібраційний дозатор сипучих матеріалів

Розглянемо вібраційний дозатор [8] (рис. 1.6), що містить поздовжні балки 7, жорстко з'єднані між собою поперечиною, на яких встановлені косинки 9, передні стійки 4 і задні стійки 1, поздовжні кутники 3, перемички 8, за допомогою кронштейнів 19 закріплені на них ресори 10, що з'єднують поворотну раму 5 з віброжолобом 11. До складу віброжолоба входять перемішуючі елементи 12, стрижні 13 і регулювальні пластини 14. На раму 6 встановлені бункери-дозатори 17, які забезпечені регулювальними механізмами подачі кормів 18. Складовими частинами дозатора є також однофазний частотний перетворювач 16, вхід якого з'єднаний з мережею змінного струму і трифазний лінійний асинхронний двигун 15. Вторинним елементом трифазного лінійного асинхронного двигуна є тяга 2, жорстко пов'язана з віброжолобом 11 і розташована з боку приводу. Одна обмотка трифазного лінійного асинхронного двигуна 15 з'єднана з мережею змінного струму, а дві інші включені послідовно і з'єднані з виходом однофазного частотного перетворювача 16.

Вібраційний дозатор сипучих кормів працює наступним чином. Вихідні сипучі корми подаються через бункери-дозатори 17 в віброжолоб 11. Віброжолоб 11 забезпечений перемішуючими елементами 12, стрижнями 13 і регулювальними пластинами 14. Віброжолоб 11 приводиться в рух трифазним лінійним асинхронним двигуном 15 і тягою 2, жорстко пов'язаною з корпусом віброжолоба і є вторинним елементом трифазного лінійного асинхронного двигуна 15. Під дією вібрації сипучі корми переміщуються в віброжолобі 11 до першого перемішуючого елемента, на якому завдяки конічним поверхням відбувається розпушення і первинне змішування. Далі частки сипучої маси, що надходять на конічні поверхні на різних відстанях від осей їх основ, які паралельні поздовжнім осям жолобу, в результаті зіткнення з конусами відображаються з різними швидкостями і в різних напрямках, що сприяє інтенсифікації змішування.

Після цього корм падає з зубчастої складової перемішуючого елемента на днище віброжолоба і переміщується по конічних поверхнях, але вже

другого і наступного перемішуючого елементів. Перемішана маса сходить з розвантажувального жолоба [8].

## 1.2. Структури автоматизованих комплексів багатокomпонентного дозування сипких матеріалів

В даний час розроблено велику кількість автоматизованих комплексів з приготування багатокomпонентних сумішей. Вимоги до таких комплексах, визначаються такими критеріями, як автономність системи, точність дозування, енергетична ефективність. Виходячи з цих вимог, можна провести аналіз наявних розробок у цій галузі.

Запропоновано комплекс для приготування комбікормів [10], що дозволяє отримати точне і повне дозування згідно зі встановленим рецептом компонентів комбікорму і мікродобавок з включенням компонентів вермікультури, що призводить до отримання високобілкового збалансованого корму. Управління комплексом здійснюється системою програмованого управління з ЕОМ, яка забезпечує автоматизоване управління дозуванням компонентів комбікорму.

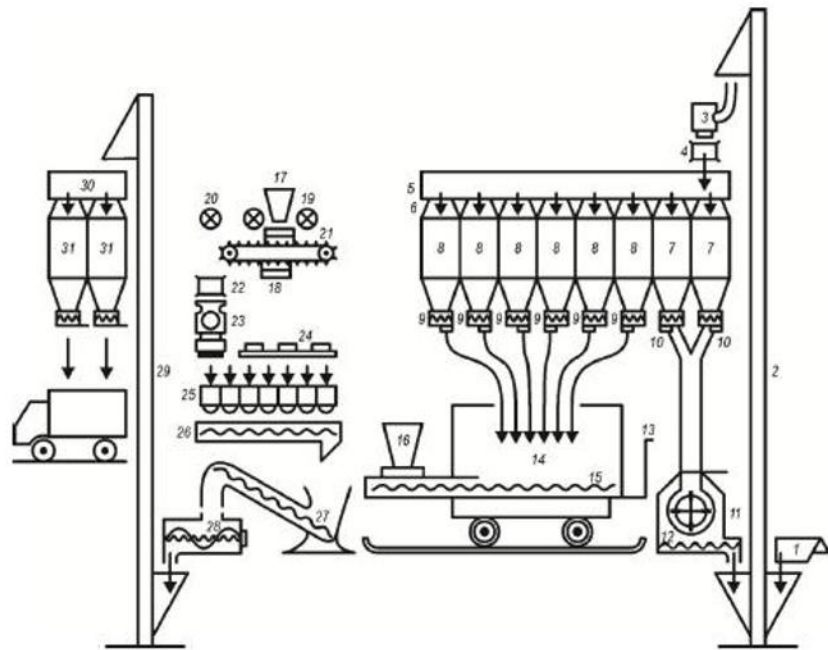


Рисунок 1.7 – Цех для приготування комбікорму

Комплекс (рис. 1.7) включає наступні технологічні лінії:

- прийому вхідної сировини;
- подрібнення зернового корму;
- приготування і внесення білково-вітамінного корму
- внесення мікродобавок;
- розвантаження готового комбікорму;
- програмуємого управління дозуванням компонентів комбікорму.

Комплекс для приготування комбікормів працює в порціонному циклічному режимі наступним чином. Число доз кожного компонента комбікорму задають відповідно до рецепту готуємого комбікорму і загальною масою однієї порції комбікорму.

Дана система порційного дозування має істотний недолік – узгодження швидкості і положення візка з частотою обертання шнекових дозаторів і поточною вагою відповідно до рецепту.

Черговість дозування матеріалу з бункерів в даній системі має пріоритетне значення. Технологічні завдання виробництва комбікормів можуть призводити до зміни черговості подачі матеріалу в ваговий візок. Це, безсумнівно, призведе до зменшення продуктивності і рентабельності продукції.

Також пропонується реалізувати технологію дозування і формування комбікормів із застосуванням проміжних вагових пристроїв. Цей пристрій [11] для приготування багатокомпонентних сумішей містить (рис. 1.8) бункера запасу 1, 2, 3, 4 компонентів суміші кормів, які постійно поповнюються (концентрованих, грубих, соковитих, мінеральних) з дозаторами 5, 6, 7, 8 (наприклад, шнековими), керованими виходами 9 комп'ютера і які працюють на збірний бункер 10 через вагові пристрої 11 з днищами, які відкриваються 12 на датчиках-платформах 13 (наприклад, типу Т70 фірми «Тензо-М»).

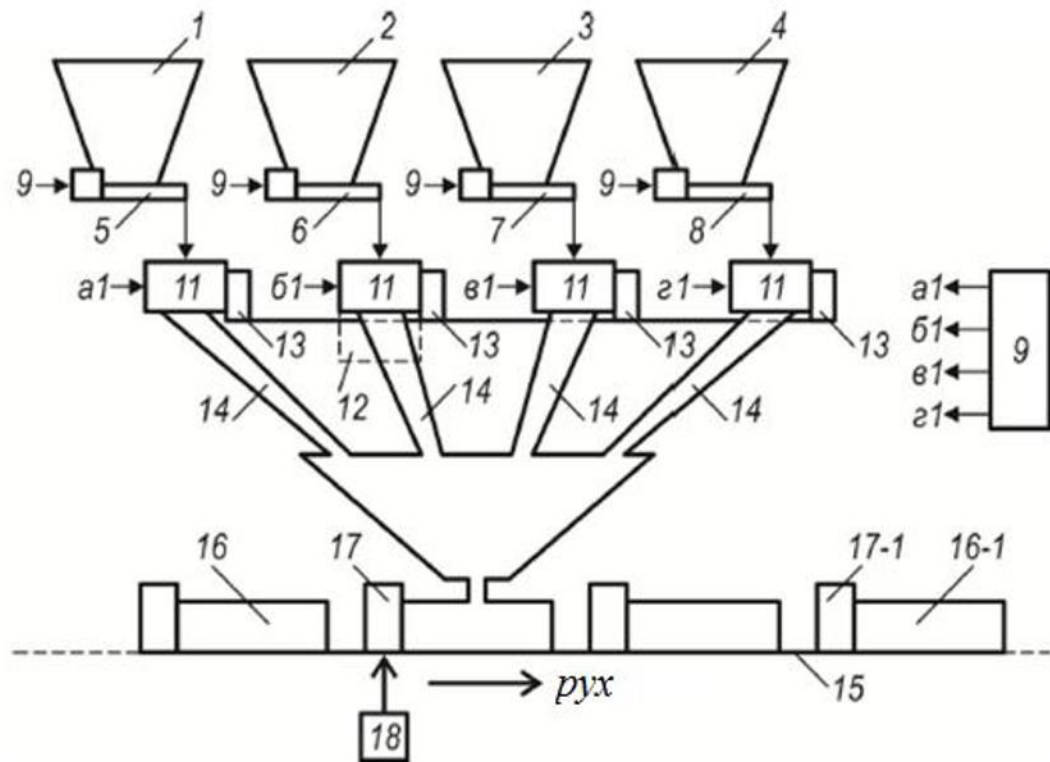


Рисунок 1.8 – Пристрій для приготування багатокомпонентних сумішей

Фрагмент вагового пристрою 11 (рис. 1.9), являє собою коробка 19 (за кількістю бункерів 1, 2, 3, 4) з шарнірно відкриваємими днищами 12 з противагами 20 і засувками з протилежного боку (на рис. 1.9 засувки не показані). На бічній стороні коробів 19 закріплені електронні плати 21, плати контролерів ТВ-003/05Д фірми «Тензо-М». Платформа 22 призначена для кріплення датчиків-платформ 13, а бортик 23 забезпечує надійне потрапляння компонент в коробки 19.

Пристрій для приготування багатокомпонентних сумішей містить бункера компонентів з дозаторами, пов'язаними з керуючими виходами комп'ютера, збірний бункер, вагові пристрої та транспортер і відрізняється тим, що вагові пристрої являють собою встановлені на платформі коробка з відкриваємими днищами, пов'язані з комп'ютером і з'єднані через лотки зі збірним бункером; транспортер забезпечений розташованими на ньому годівницями з стікерами штрих-кодів, а на місці вивантаження компонентів з

бункерів встановлений конвеєрний сканер, що передає на комп'ютер інформацію зі штрих-кодів годівниць.

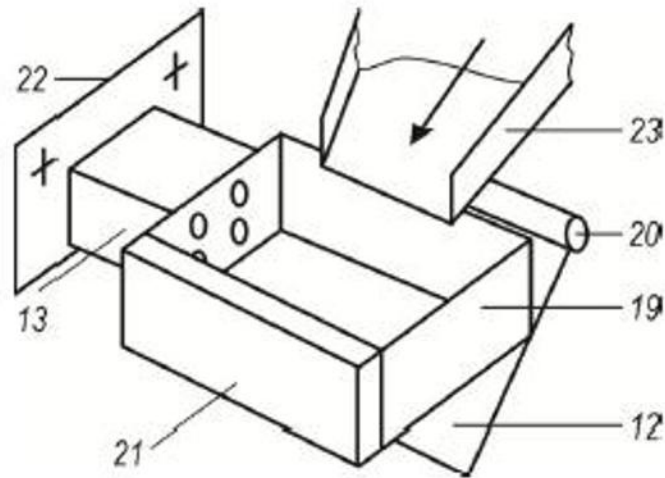


Рисунок 1.9 – Фрагмент вагового пристрою

Дана система порційного дозування має ускладнену конструкцію (збільшено кількість вагових пристроїв), а також, згідно з описом, формує одночасну роботу всіх шнекових дозаторів. Оскільки в даному випадку використовувати почергове дозування не раціонально через наявність індивідуальних вагових пристроїв, необхідно реалізовувати безперервне формування сумішей з паралельною роботою  $n$  кількістю шнеків. В цьому випадку для кожного дозатора потрібен свій власний модуль управління, а саме перетворювач частоти – асинхронний двигун, що багаторазово збільшує вартість пристрою, його налаштування і експлуатацію.

### **1.3. Автоматизований комплекс дозування і змішування компонентів комбікормів**

Найбільш доцільною структурою комплексу для виробництва комбікормів є дозування всіх компонентів комбікорму в загальному бункері дозатора при переміщенні кожного компонента окремим шнеком. Управління

асинхронними двигунами шнекових дозаторів проводиться від одного перетворювача частоти зі скалярним керуванням.

Залежно від технологічних вимог автоматичні дозатори можуть застосовуватися для вирішення наступних завдань:

- підтримання необхідного миттєвого значення витрати;
- підтримання заданої середньої витрати за певний проміжок часу;
- забезпечення сумарної кількості матеріалу за певний цикл [5].

До процесу дозування сипких матеріалів взагалі і компонентів комбікорму зокрема ставляться такі вимоги [37], недотримання яких призводить до зниження точності дозування і якості продукції, що випускається:

- 1) забезпечення необхідної витрати по параметру – регулювання продуктивності;
- 2) забезпечення величини витрати по параметру в межах допустимих відхилень при певній або довільній зміні значення параметрів матеріалу – точність дозування;
- 3) забезпечення сталості витрати по параметру або заданої зміни витрати в часі – стійкість дозування.

Функціональна схема асинхронного електроприводу шнекового дозатора для автоматичного дозування сипких матеріалів представлена на рис. 1.10. Слід зазначити, що кінцева суміш може складатися з декількох різних компонентів. Автоматизація технологічного процесу дозволяє управління від одного перетворювача частоти (ПЧ) декількома шнековими дозаторами (ШД), число яких не буде перевищувати кількість каналів блоку релейної комутації (БРК). Дозування суміші відбувається в загальному бункері дозатора.

Двигуни засувок бункера-дозатора і бункера-змішувача, двигуни змішувача і розпушувача включаються в мережу безпосередньо через силові контактори фірми Moeller. Для шнекових дозаторів потрібно плавне регулювання швидкості, тому їх двигуни управляються за допомогою перетворювача частоти EI-7011 фірми «Веспер». Оскільки технологічний

процес не вимагає одночасної роботи двох і більше шнекових дозаторів, всі двигуни підключаються до одного і того ж перетворювача частоти по черзі через комутатор з силових контакторів фірми Moeller.

Всі автоматичні вимикачі, змонтовані в шафу, також обрані виробництва фірми Moeller.

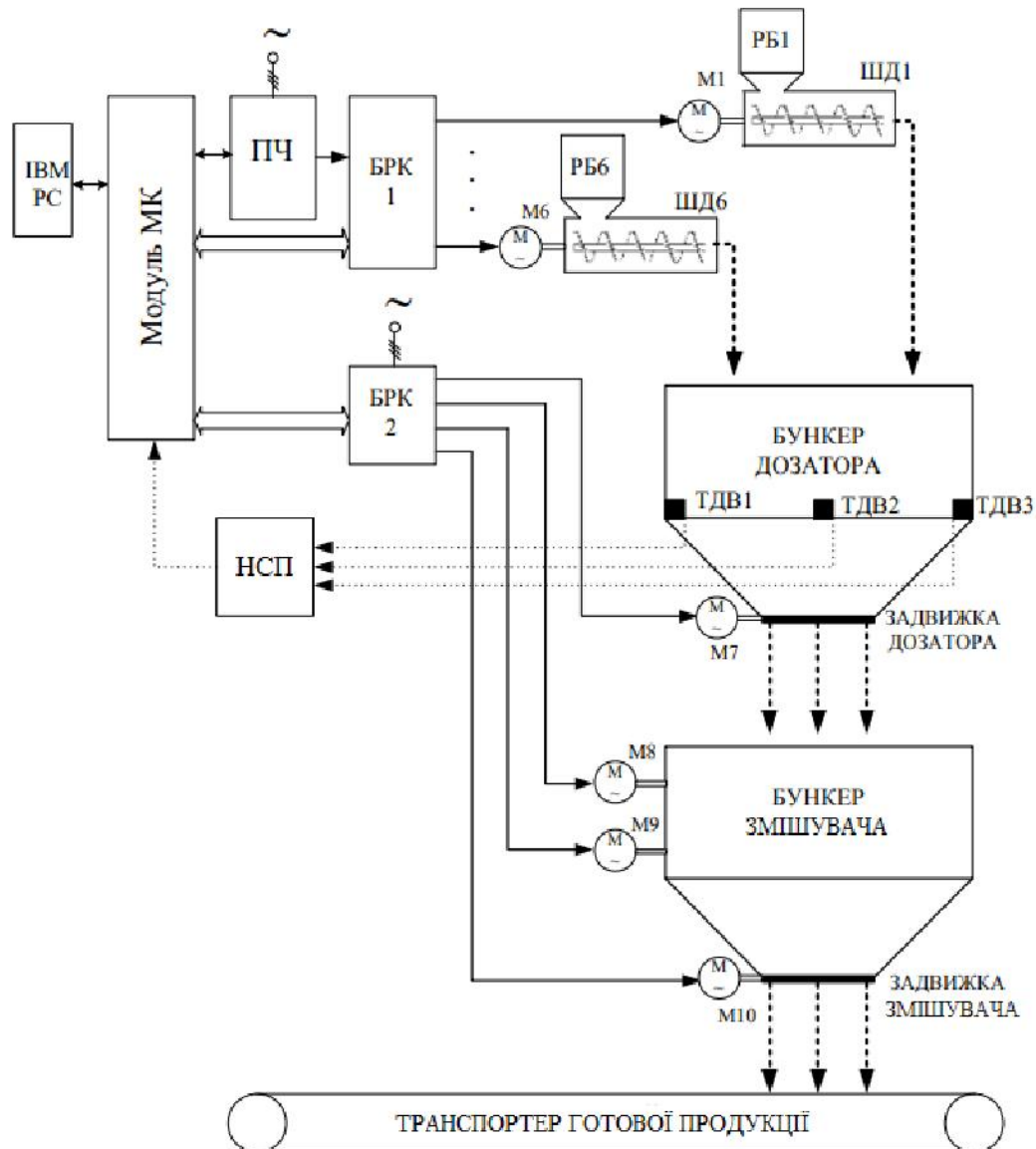


Рисунок 1.10 – Функціональна схема асинхронного електроприводу шнекового дозатора для автоматичного дозування сипких матеріалів  
 ПЧ – перетворювач частоти; БРК – блок релейної комутації; НСП – нормуючий і сумуючий підсилювач; РБ – розходний бункер; ШД – шнековий дозатор;  
 МК – мікроконтролер

Вхідними дискретними сигналами від технологічного обладнання є сигнали типу «сухий контакт» від кінцевих вимикачів засувки, датчика блокування відкриття оглядового вікна бункера-змішувача, датчика рівня бункера відвантаження готової продукції, а також датчика руху норії. Крім того, на контролер заводяться дискретні сигнали підтвердження включення контакторів. Напряга живлення більшості «сухих контактів» в схемі 24 В.

Дана структура багатокомпонентного дозування відрізняється від відомих тим, що від загального перетворювача частоти можуть управлятися  $n$ -шнекових дозаторів, де  $n$  – число компонентів кормосуміші. Комутація силових ланцюгів відбувається за сигналом мікроконтролера за допомогою блоку релейної комутації. Скалярне управління перетворювача частоти дозволяє управління асинхронними двигунами шнекових дозаторів різної потужності. Завдяки цьому організовується безперервне виготовлення суміші з максимальною продуктивністю. Також використання одного перетворювача частоти на  $n$  каналів дозування значно здешевлює витрати на створення проекту і зменшує витрати на монтаж і обслуговування.

Вимірювання поточної ваги бункера-дозатора здійснюється трьома тензодатчиками типу МК2-1-С3 фірми «Тензо-М». Сигнали з тензодатчиків надходять в сумуючий блок, а потім в нормуючий підсилювач НУ-420DC, які знаходяться в безпосередній близькості від датчиків. Тут сигнал посилюється, гальванічно ізолюється і нормалізується в стандартний струмовий сигнал 4 ... 20 мА. У цьому вигляді інформація про вагу надходить в контролер.

Застосування автоматизованого процесу дозування дозволяє мінімізувати помилку дозування при оптимальному значенні продуктивності. Також алгоритми управління шнековими дозаторами дозволяють компенсувати помилку, викликану падаючим стовпом матеріалу.

До складу обладнання з виробництва комбикормів [12 ... 15] входять:

- шість витратних бункерів, які вміщують дозуємі компоненти (ячмінь, горох, висівки пшеничні, пшениця, шрот соняшниковий, концентрат);
- шість шнекових дозаторів;

- бункер-дозатор вантажопідйомністю до 1000 кг, підвішений на трьох тензодатчиках (рис. 1.11);



Рисунок 1.11 – Бункер дозатора

- бункер-змішувач, оснащений асинхронним двигуном змішувача потужністю 15 кВт (рис. 1.12) і двигуном розпушувача;
- бункер відвантаження готової продукції с датчиком місткості рівня;
- транспортна підсистема відвантаження готової продукції.



Рисунок 1.12 – Бункер змішувача

В цілому об'єкт автоматизації включає в себе 10 асинхронних електродвигунів потужністю від 1,7 до 15 кВт.

Зернова сировина надходить в витратні бункера шляхом автомобільного терміналу. Завантаження одного бункера ємністю 50 т. займає не менше 3 годин. Після завантаження витратних бункерів компоненти по черзі надходять в бункер-дозатор, де відповідно до заданого рецепту здійснюється дозування. Після закінчення процесу дозування всіх компонентів маса надходить в бункер-змішувач. Час змішування варіюється від 1 до 3 хвилин в залежності від обраного рецепта. Готова суміш надходить в бункер відвантаження готової продукції. Відвантаження готової продукції відбувається через автомобільний термінал з продуктивністю 15 т. на годину.

Розроблена система управління функціонує в трьох режимах:

1. Автоматичний режим. В цьому режимі оператор задає необхідний рецепт з бази рецептів та кількість порцій (сумарна вага однієї порції – до 1000 кг).
2. Ручний режим з автодозуванням. Управління здійснюється з використанням віртуального пульта. Оператор забезпечує запуск дозування, відкриття і закриття засувки дозатора і змішувача, запуск і зупинка змішувача. Зупинка шнекових дозаторів відбувається автоматично при досягненні маси дозованих компонент заданих значень.
3. Ручний режим без автодозування. Управління процесом дозування і змішування здійснюється так само, як і в ручному режимі з автодозуванням, але на відміну від нього зупинка шнекових дозаторів здійснюється оператором. Даний режим використовується для налагодження і пошуку несправностей.

Крім того, система управління дозування і змішування компонентів комбікорму виконує наступні функції:

- 1) аналіз поточного стану виконавчих пристроїв нижнього рівня управління (перетворювач частоти, силові контактори);
- 2) перевірка на перевантаження бункера-дозатора і бункера-змішувача;
- 3) паралельна робота підсистем дозування, змішування і відвантаження;
- 4) непрямий аналіз технологічних несправностей шляхом перевірки завантаження та відвантаження компонентів з бункера-дозатора по датчику ваги;
- 5) автоматичний облік і ведення баз даних витрати в виробництво дозованих компонентів, виходу готової продукції, розрахунок залишку компонентів на кінець дня;
- 6) облік використовуваних рецептів за зміну;
- 7) ведення бази рецептів;

- 8) установка необхідного часу змішування компонентів;
- 9) відображення стану витратних бункерів в реальному часі;
- 10) звукова сигналізація і блокування роботи виконавчих механізмів при виникненні аварійної ситуації;
- 11) ведення журналу подій за останні два місяці експлуатації.

### **Висновки по розділу 1**

1. Аналіз відомих технічних рішень дозування показує, що найбільш доцільним для приготування кормосумішей є використання шнекових дозаторів, так як вони мають високу продуктивність і послідовно-порційне переміщення матеріалу в бункер-дозатор. Ці властивості дозволяють спрогнозувати масу падаючого стовпа матеріалу і досягти, таким чином, високої точності дозування.
2. Встановлено, що для забезпечення повної автоматизації технологічного процесу дозування сипких матеріалів запропоновано використовувати автоматизований комплекс дозування із загальним перетворювачем частоти і бункером-дозатором на тензодатчиках ваги.
3. Необхідно розробити ефективні алгоритми керування електротехнічним комплексом виробництва комбікормів, який забезпечує задану точність по кожному компоненту (3%) суміші в загальному бункері-дозаторі при максимальній продуктивності шнекових дозаторів.

## 2. МАТЕМАТИЧНІ ТА ІМІТАЦІЙНІ МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ ДОЗУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

Побудова математичної моделі шнекового дозатора потрібна для перевірки працездатності синтезованої системи управління дозувальним комплексом з метою апробації розроблених алгоритмів компенсації помилки дозування з урахуванням особливостей дозованих матеріалів, а саме змін властивостей суміші в часі випадковим чином і впливу падаючого стовпа матеріалу на помилку дозування.

Для побудови математичної моделі електротехнічного комплексу дозування сипких матеріалів підвищеної точності використовуємо блоковий принцип, суть якого полягає в тому, що модель будується з окремих логічно закінчених блоків, що відображають суть розглянутого процесу [6].

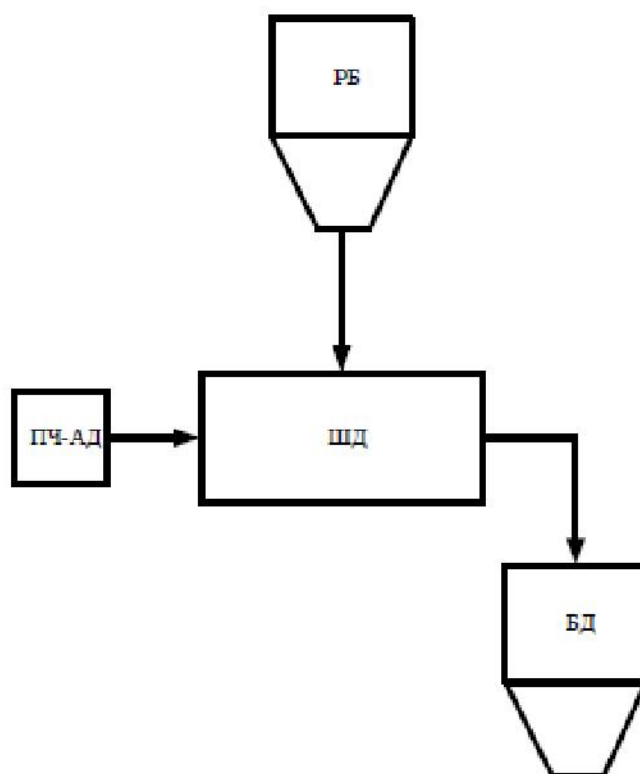


Рисунок 2.1 – Електротехнічний комплекс дозування сипких матеріалів

На рис.2.1 представлена узагальнена функціональна схема електротехнічного комплексу дозування сипких матеріалів, який складається з витратного бункера (РБ), шнекового дозатора (ШД), що переміщує матеріал в бункер дозатора (БД). Мікропроцесорне управління ШД здійснюється від системи перетворювач частоти - асинхронний двигун (ПЧ-АД) зі скалярним керуванням. Далі наведемо математичний опис кожного елемента комплексу.

## **2.1. Математичний опис асинхронного двигуна з частотним перетворювачем**

Асинхронний двигун є основним елементом в системах дозування з шнековим дозатором, за допомогою якого здійснюється управління рухом шнека. Для імітаційного моделювання системи дозування сипких матеріалів необхідно вибрати деталізацію розгляду математичної моделі асинхронного двигуна.

Математичний опис процесів у всіх електромеханічних перетворювачах заснований на складанні і вирішенні диференціальних рівнянь Кірхгофа. Найбільш повно описує процеси, які протікають в асинхронному двигуні, трифазна математична модель асинхронного двигуна в загальмованій системі координат [25, 26]. Таке уявлення дозволяє виключити з диференціальної системи рівнянь взаємну індукцію від суміжних фаз і складові ЕРС обертання.

Розглянемо математичну модель АД в загальмованій системі координат [25].

При моделюванні асинхронного двигуна приймемо ряд припущень:

- величини активних опорів і індуктивностей постійні;
- магнітна система не насичена, втрати на гістерезис і в сталі від вихрових струмів відсутні;
- розподіл індукції в повітряному проміжку – рівномірний.

Перераховані допущення дозволяють сформулювати два основних положення:

- розподіл потоку, створеного обмотками статора і ротора, в повітряному зазорі синусоїдальний;
- магнітне поле плоскопаралельне, робоче поле і поле розсіювання взаємно незалежні.

Для спільності опису процесів в статорному та роторному колі використовують коефіцієнти приведення. Приведення параметрів обмоток до однакового числа витків дозволяє [27, 28, 29]:

- скласти рівняння асинхронного двигуна, в які не входить число витків в фазі обмотки;
- застосовувати для параметрів статора і ротора одну систему базових величин при приведенні до відносних одиниць;
- скласти еквівалентні електротехнічні схеми заміщення.

Рівняння для напруг фаз статора АД можна представити у вигляді (2.1)

$$\begin{aligned} U_{s\alpha} &= r_{s\alpha} \cdot i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt}; \\ U_{s\beta} &= r_{s\beta} \cdot i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt}; \\ U_{s\gamma} &= r_{s\gamma} \cdot i_{s\gamma} + \frac{d\psi_{s\gamma}}{dt}. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Рівняння для напруг фаз ротора можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} -U_{r\alpha} &= r_{r\alpha} \cdot i_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + (\psi_{r\beta} - \psi_{r\gamma})\omega_r / \sqrt{3}; \\ -U_{r\beta} &= r_{r\beta} \cdot i_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + (\psi_{r\gamma} - \psi_{r\alpha})\omega_r / \sqrt{3}; \\ -U_{r\gamma} &= r_{r\gamma} \cdot i_{r\gamma} + \frac{d\psi_{r\gamma}}{dt} + (\psi_{r\alpha} - \psi_{r\beta})\omega_r / \sqrt{3}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Потокозчеплення статора визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned}
\Psi'_{s\alpha} &= L_{s\alpha} \cdot i_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{s\beta} + i_{s\gamma}) + L_m \cdot (i_{r\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\beta} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\gamma}); \\
\Psi'_{s\beta} &= L_{s\beta} \cdot i_{s\beta} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{s\gamma} + i_{s\alpha}) + L_m \cdot (i_{r\beta} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\gamma}); \\
\Psi'_{s\gamma} &= L_{s\gamma} \cdot i_{s\gamma} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{s\beta} + i_{s\alpha}) + L_m \cdot (i_{r\gamma} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\beta}).
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Потокозчеплення ротора визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned}
\Psi'_{r\alpha} &= L_{r\alpha} \cdot i_{r\alpha} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{r\beta} + i_{r\gamma}) + L_m \cdot (i_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\beta} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\gamma}); \\
\Psi'_{r\beta} &= L_{r\beta} \cdot i_{r\beta} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{r\gamma} + i_{r\alpha}) + L_m \cdot (i_{s\beta} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\gamma}); \\
\Psi'_{r\gamma} &= L_{r\gamma} \cdot i_{r\gamma} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{r\beta} + i_{r\alpha}) + L_m \cdot (i_{s\gamma} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\beta}),
\end{aligned} \tag{2.4}$$

де  $U_{s\alpha}, U_{s\beta}, U_{s\gamma}, U_{r\alpha}, U_{r\beta}, U_{r\gamma}, i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{s\gamma}$  - напруги і струми по трьох осях;

$r_{s\alpha}, r_{s\beta}, r_{s\gamma}, r_{r\alpha}, r_{r\beta}, r_{r\gamma}$  - активні опори статора і ротора;

$L_{s\alpha}, L_{s\beta}, L_{s\gamma}, L_{r\alpha}, L_{r\beta}, L_{r\gamma}$  - повні індуктивності обмоток статора і ротора;

$L_m$  - взаємна індуктивність статора і ротора;

$\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}, \Psi_{s\gamma}, \Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}, \Psi_{r\gamma}$  - результуючі потокозчеплення статора і ротора по осях;

$\omega_r$  - частота обертання ротора.

Електромагнітний момент, що розвивається машиною, можна представити таким чином:

$$M_s = p \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot L_m \cdot [(i_{s\alpha} \cdot i_{r\gamma} + i_{s\beta} \cdot i_{r\alpha} + i_{r\beta} \cdot i_{s\gamma}) - (i_{s\alpha} \cdot i_{r\beta} + i_{s\beta} \cdot i_{r\gamma} + i_{r\alpha} \cdot i_{s\gamma})] \tag{2.5}$$

Механічні процеси асинхронного двигуна можна описати основним рівнянням руху електроприводу:

$$M_s - M_c = J_r \cdot \frac{d\omega_r}{dt}. \tag{2.6}$$

Представлений математичний опис асинхронного двигуна найбільш повно характеризує процеси, що протікають в АД, однак використання трифазної моделі асинхронного двигуна можливо при наявності несиметрії в

колах статора і ротора, аварійних режимах роботи АД і докладному дослідженні процесів, що відбуваються в АД [13, 16].

Кожен шнек системи дозування працює при номінальному режимі роботи свого електродвигуна, тому можливо замість трифазної моделі АД використовувати спрощену двофазну математичну модель.

Для побудови імітаційної моделі АД скористаємося загальноприйнятими припущеннями [12]:

- не враховуються втрати в сталі;
- розглядаємо трифазний симетричний режим роботи;
- насичення магнітного кола АД не враховується;
- приймаємо напруги на виході ПЧ строго синусоїдальної форми;
- нехтуємо впливом силового каналу між АД і ПЧ.

Зовнішній вигляд двофазної ідеалізованої моделі АД представлений на рис. 2.1.

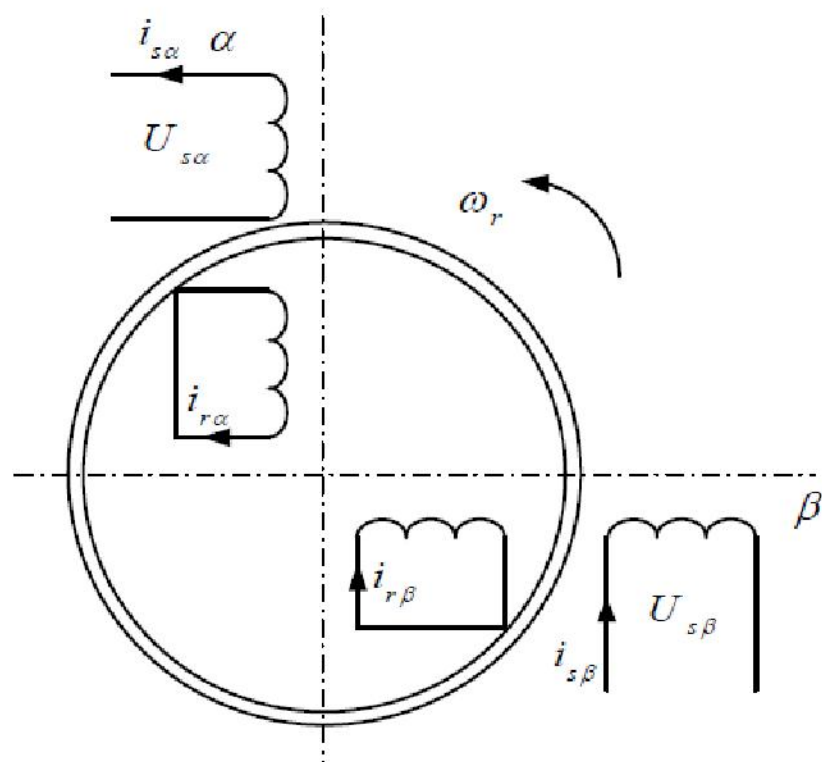


Рисунок 2.1 – Ідеалізована модель двофазного АД

Відповідно до цієї схеми розглянемо процеси, які описують цю модель АД, при цьому будемо використовувати систему наступних векторних диференціальних рівнянь [27]:

$$\begin{aligned}
 U_s &= R_s I_s + \frac{d\psi_s}{dt}; \\
 U_r &= R_r I_r + \frac{d\psi_r}{dt}; \\
 \psi_s &= L_s I_s + L_m I_r; \\
 \psi_r &= L_r I_r + L_m I_s; \\
 M &= \frac{3}{2} z_p (\vec{\psi}_s \times \vec{I}_s); \\
 \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J} (M - M_c).
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

де  $U_s$ ,  $U_r$ ,  $I_s$ ,  $I_r$ ,  $\psi_s$ ,  $\psi_r$  - двоелементні вектори напруг, струмів і потокозчеплення, представлені в ортогональній (двофазній) системі координат у вигляді складових по координатним осях.

Механічні параметри системи представлені такими змінними:  $J$  - момент інерції,  $\omega_r$  - частота обертання ротора;  $z_p$  - число пар полюсів АД;  $M$  і  $M_c$  - електромагнітний момент і момент опору навантаження відповідно. Допоміжна матрична константа  $j$  служить для «перевороту» компонентів векторних змінних і дозволяє спростити форму запису системи рівнянь.

У двофазній системі координат вектори стану АД мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 U_s &= \begin{bmatrix} U_{s\alpha} \\ U_{s\beta} \end{bmatrix}, & U_r &= \begin{bmatrix} U_{r\alpha} \\ U_{r\beta} \end{bmatrix}, & I_s &= \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}, & I_r &= \begin{bmatrix} i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix}, \\
 \psi_s &= \begin{bmatrix} \Psi_{s\alpha} \\ \Psi_{s\beta} \end{bmatrix}, & \psi_r &= \begin{bmatrix} \Psi_{r\alpha} \\ \Psi_{r\beta} \end{bmatrix}, & j &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

У нашому випадку індекси  $\alpha$  і  $\beta$  будуть відповідати компонентам вектора в нерухомій системі координат.

Реальна трифазна асинхронна машина представляється у вигляді двофазної моделі, і тому для здійснення переходу між складовими векторів в двофазних координатах і трифазній координатній системі, використовуються формули перетворення Кларка (Clarke Transformation).

На прикладі перетворення вектора струму статора  $I_s$  розглянемо зв'язок між складовими в двофазних координатах і трифазною системою (рис. 2.2). Для інших змінних перетворення будуть ідентичними.

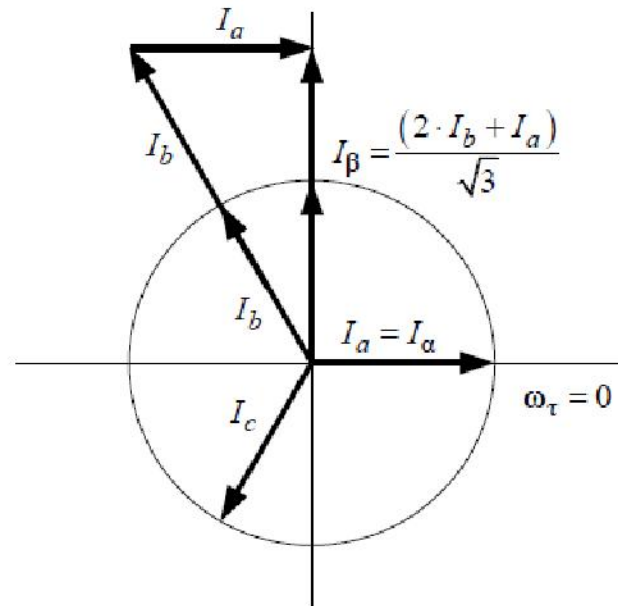


Рисунок 2.2 – Перетворення Кларка (Clarke Transformation)

$$i_{s\alpha} = i_{sa}, \quad i_{s\beta} = \frac{(2i_{sb} + i_{sa})}{\sqrt{3}}, \quad (2.9)$$

де  $i_{s\alpha}$   $i_{s\beta}$  - складові вектору струму статора;

$I_s$ , представлені в двофазній нерухомій системі координат;

$i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$  - фазні струми статора АД, представлені в симетричній трифазній системі.

Формула для зворотного перетворення утворюється з (2.9) після виконання відповідних математичних перетворень.

Система рівнянь (2.7) дає велику кількість невідомих, і для зменшення їх числа виконаємо наступну підстановку, з метою виключити з системи рівнянь змінні  $\psi_s$  і  $I_r$ , залишивши  $\psi_r$  і  $I_s$ . Для цього з третього і четвертого рівнянь системи (2.7) висловимо  $I_r$ :

$$I_r = \frac{\psi_s - L_s I_s}{L_m}, \quad I_r = \frac{\psi_r - L_m I_s}{L_r}. \quad (2.10)$$

Прирівнюючи обидві частини виразів, отримуємо

$$\psi_s - L_s I_s = \frac{L_m}{L_r} (\psi_r - L_m I_s),$$

з якого тепер виділяємо  $\psi_s$

$$\psi_s = \frac{L_m}{L_r} \psi_r + \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) I_s. \quad (2.11)$$

Після цього в перше рівняння системи (2.7) підставляємо вираз для  $\psi_s$  (2.11):

$$U_s = R_s I_s + \frac{d\psi_s}{dt} = R_s I_s + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_r}{dt} + \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{dI_s}{dt}. \quad (2.12)$$

У друге рівняння системи (2.7) підставляємо  $I_r$ :

$$\begin{aligned} U_r &= R_r I_r + \frac{d\psi_r}{dt} - j\omega_r z_p \psi_r = \\ &= R_r \left( \frac{\psi_r - L_m I_s}{L_r} \right) + \frac{d\psi_r}{dt} - j\omega_r z_p \psi_r = \\ &= \frac{d\psi_r}{dt} - j\omega_r z_p \psi_r + R_r \frac{\psi_r}{L_r} - R_r \frac{L_m}{L_r} I_s = \\ &= \frac{d\psi_r}{dt} - \left( j\omega_r z_p + \frac{R_r}{L_r} \right) \psi_r - R_r \frac{L_m}{L_r} I_s. \end{aligned} \quad (2.13)$$

З (2.7) отримуємо вираз для  $\frac{d\psi_r}{dt}$  і підставляємо в (2.12):

$$\begin{aligned} U_s &= R_s I_s + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_r}{dt} + \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{dI_s}{dt} = \\ &= R_s I_s + \frac{L_m}{L_r} U_r + \frac{L_m}{L_r} \left( j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \psi_r + R_r \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 I_s + \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{dI_s}{dt}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Остаточно наводимо рівняння (2.14) до наступного вигляду:

$$U_s - \frac{L_m}{L_r} U_r = \left[ R_s + R_r \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 \right] I_s + \frac{L_m}{L_r} \left( j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \psi_r + \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{dI_s}{dt}. \quad (2.15)$$

Тепер комбінуємо разом (2.13) і (2.15), після чого отримуємо систему, еквівалентну (2.7), але складається тільки з двох рівнянь з двома невідомими –  $\psi_r$  і  $I_s$ . Для АД з короткозамкненим ротором справедливо  $U_r=0$ . Вираз для електромагнітного моменту перепишемо з використанням (2.11):

$$\begin{cases} U_s = \left[ R_s + R_r \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 \right] I_s + \frac{L_m}{L_r} \left( j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \psi_r + \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{dI_s}{dt}, \\ 0 = \frac{d\psi_r}{dt} - \left( j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \psi_r - R_r \frac{L_m}{L_r} I_s, \\ M = \frac{3}{2} z_p \frac{L_m}{L_r} (\psi_r \times I_s), \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_c). \end{cases} \quad (2.16)$$

Для спрощення запису системи рівнянь введемо додаткові коефіцієнти і перейдемо до операторної форми [27].

$$\begin{cases} U_s = R_e I_s + K_r j\omega_r z_p \psi_r - K_r A_r \psi_r + L_e p I_s, \\ 0 = p \psi_r - j\omega_r z_p \psi_r + A_r \psi_r - R_r K_r I_s, \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\psi_r \times I_s), \\ p \omega_r = \frac{1}{J} (M - M_c), \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\text{де } K_r = \frac{L_m}{L_r}; \quad R_e = R_s + R_r \cdot K_r^2; \quad L_e = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}; \quad A_r = \frac{R_r}{L_r}.$$

Систему (2.15) перепишемо, виразивши похідні вектору струму і потокозчеплення:

$$\begin{cases} p I_s = \frac{1}{L_e} (U_s - R_e I_s - K_r \omega_r z_p j \psi_r + K_r A_r \psi_r), \\ p \psi_r = R_r K_r I_s - A_r \psi_r + \omega_r z_p j \psi_r, \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\psi_r \times I_s), \\ p \omega_r = \frac{1}{J} (M - M_c). \end{cases} \quad (2.18)$$

Потім систему векторних рівнянь (2.18) необхідно подати в скалярному вигляді, підставивши замість векторів  $\psi_r$  і  $I_s$  їх складові за координатами.

Векторний добуток в виразі для електромагнітного моменту розкриємо відповідно до правил векторної алгебри. З урахуванням (2.8) отримуємо нову систему скалярних рівнянь, що має такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} p i_{s\alpha} = \frac{1}{L_e} (u_{s\alpha} - R_e i_{s\alpha} - K_r \omega_r z_p j \psi_{r\beta} + K_r A_r \psi_{r\alpha}), \\ p i_{s\beta} = \frac{1}{L_e} (u_{s\beta} - R_e i_{s\beta} - K_r \omega_r z_p j \psi_{r\alpha} + K_r A_r \psi_{r\beta}), \\ p \psi_{r\alpha} = R_r K_r i_{s\alpha} - A_r \psi_{r\alpha} + \omega_r z_p j \psi_{r\beta}, \\ p \psi_{r\beta} = R_r K_r i_{s\beta} - A_r \psi_{r\beta} + \omega_r z_p j \psi_{r\alpha}, \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\psi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}), \\ p \omega_r = \frac{1}{J} (M - M_c). \end{array} \right. \quad (2.19)$$

Дану систему диференціальних рівнянь в операційному вигляді (2.19) представимо у вигляді структурної моделі [28]. Отримана структурна схема представлена на рис. 2.3, на основі якого була створена імітаційна модель в програмі MATLAB Simulink [36].

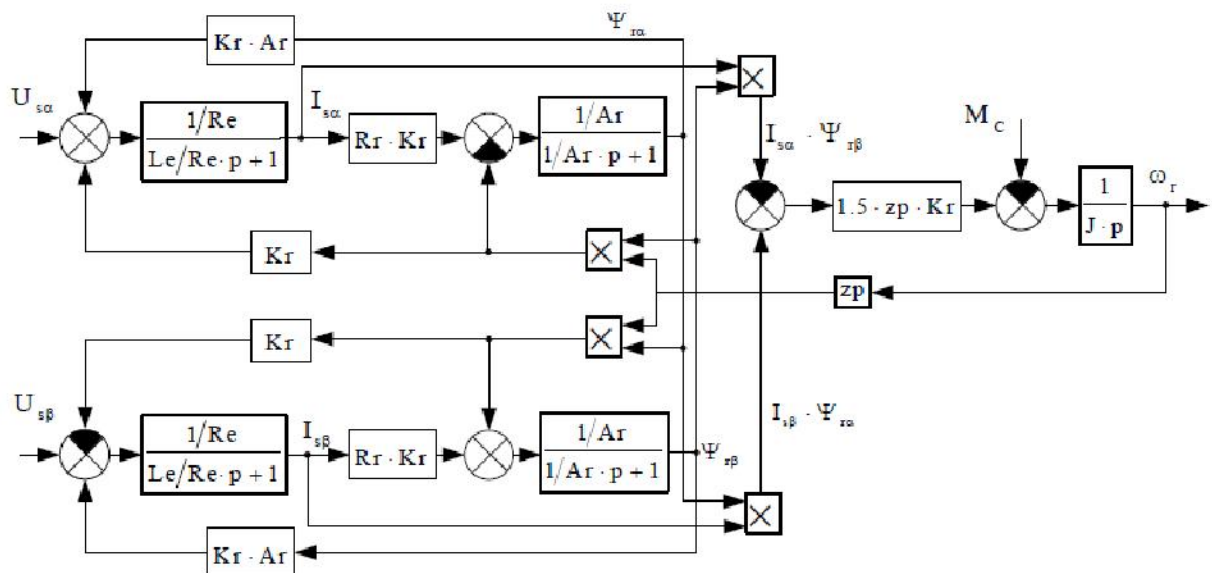


Рисунок 2.3. Структурна схема імітаційної моделі АД при використанні нерухомої системи координат

Асинхронні двигуни в системі дозування сипких матеріалів, а саме в системі приготування комбікорму, управляються від перетворювача частоти з

ланкою постійного струму. Беручи до уваги той факт, що з точки зору економічної ефективності та повної автоматизації технологічного процесу дозування компонентів комбікорму, управління асинхронними двигунами шнекових дозаторів доцільно здійснювати від загального перетворювача частоти. Загальний ПЧ має налаштування на шість виконавчих АД шнекових дозаторів з різною продуктивністю і потужністю. Всі двигуни шнеків по черзі підключаються до ПЧ за допомогою блоку релейної комутації відповідно до алгоритму роботи системи дозування.

Двигуни шнекових дозаторів мають різну потужність і параметри схеми заміщення. Ця обставина не дозволяє використовувати частотний перетворювач з векторним керуванням, і управління дозуванням здійснюється від перетворювача частоти зі скалярним керуванням.

Імітаційна модель частотного управління асинхронного двигуна шнекових дозаторів розроблена в програмі Simulink Matlab і зображена на рис. 2.4.

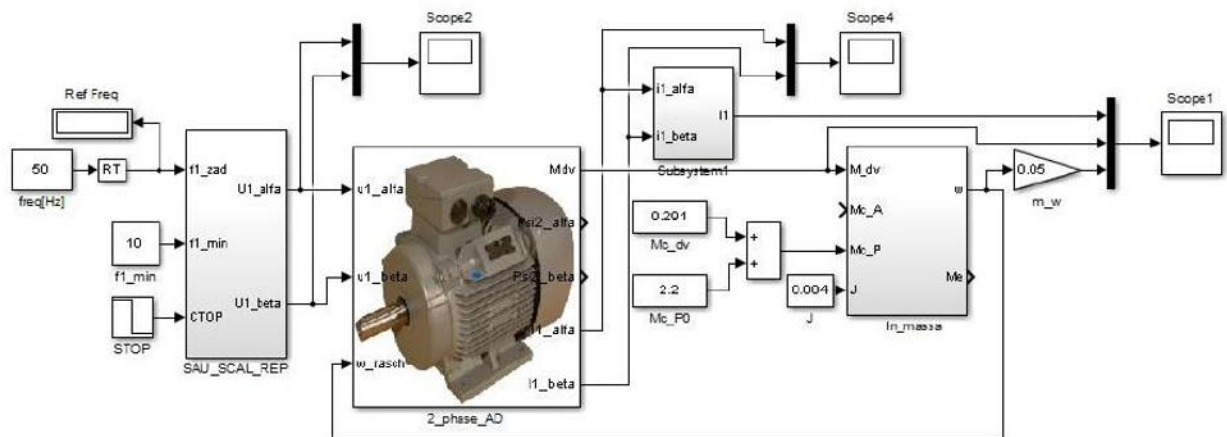


Рисунок 2.4 – Імітаційна модель системи ПЧ-АД

На вхід підсистеми перетворювача частоти зі скалярним керуванням надходить сигнал завдання з регулятора ваги і також постійне значення мінімальної частоти, при якому ПЧ відключається.

На виході схеми скалярного управління ПЧ (рис.2.5) формуються дві напруги змінного струму (синусоїдальної і косинусоїдальної форми):

$$u_{1\alpha} = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t) \text{ и } u_{1\beta} = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t)$$

Амплітуда  $U_1$  формується відповідно до закону  $U_1/f_1 = const$  при зміні частоти завдання перетворювача.

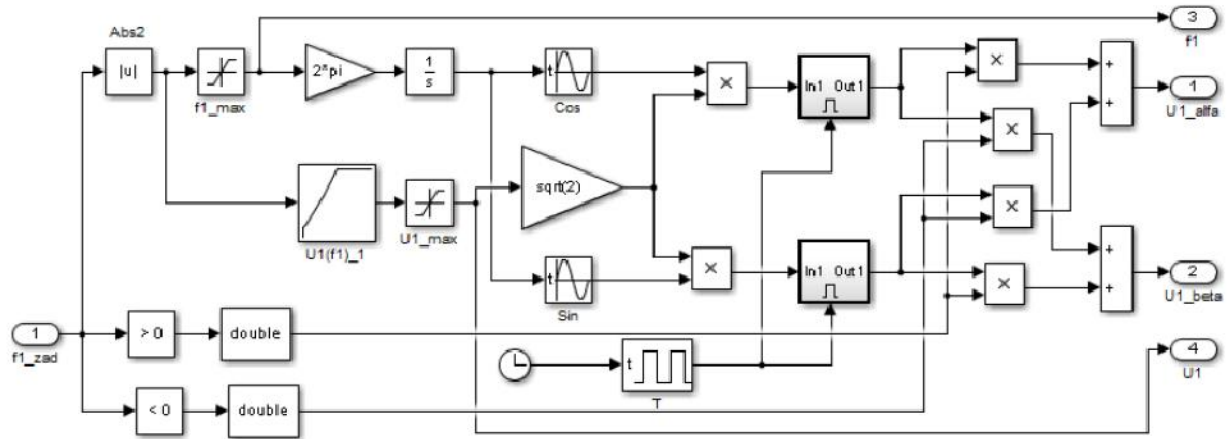


Рисунок 2.5 – Імітаційна модель перетворювача частоти зі скалярним керуванням

Сигнали напруги в нерухомій системі координат, що надходять на вхід електродвигуна, попередньо квантуються за часом з постійним кроком. Постійний період квантування відповідає частоті квантування ШІМ.

## 2.2. Визначення коефіцієнта передачі шнекового дозатора

Для імітаційного моделювання роботи шнекового дозатора необхідно визначити коефіцієнт передачі шнека [1, 2, 37].

Так як експериментальне дослідження розроблених алгоритмів проводиться на дослідній установці для дозування гранул поліпропілену, то коефіцієнт шнекового дозатора і імітаційні моделі розроблені для дозування цього сипучого матеріалу.

Параметри шнекового дозатора експериментальної установки:

$S = 32$  мм - крок гвинта;

$d = 22$  мм - діаметр вала;

$D = 38$  мм - зовнішній діаметр шнека;

$n = 149$  об / хв - швидкість обертання;

напрямок шнека - горизонтальний.

Величина пасивної поверхні на шнеку [1] (Рис. 2.6)

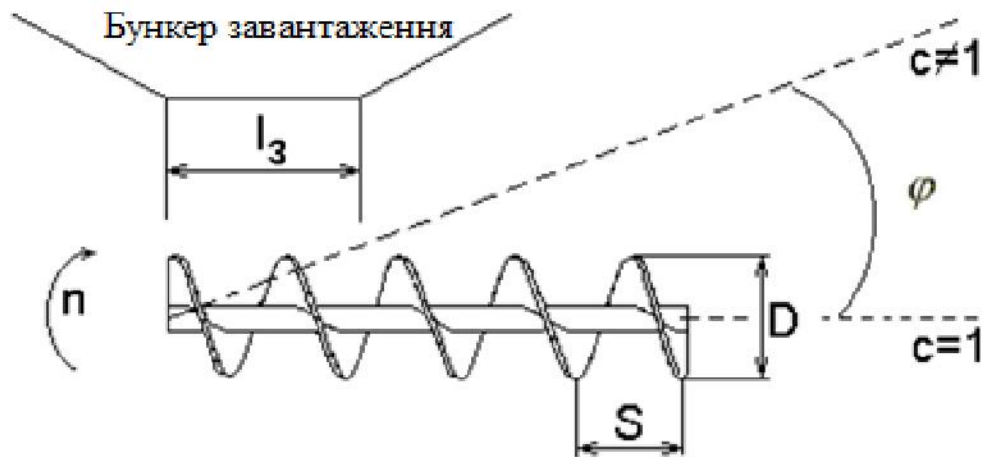


Рисунок 2.6 – Параметри шнека

$$f = \left( \frac{S}{4 \cdot \pi \cdot \cos \lambda_0} \right)^2 \cdot (\sin (2 \cdot \lambda_0) - 2 \cdot \lambda_0 \cdot \cos (2 \cdot \lambda_0)), \quad (2.20)$$

де  $\lambda_0$  - кут тертя матеріалу об поверхню шнека (табл. 2.1);  $S$  - крок гвинта шнека, м.

Таблиця 2.1 – Кут тертя матеріалу об поверхню шнека

Матеріал	Насипна об'ємна маса, кг/м <sup>3</sup>	Кут тертя матеріалу об поверхню шнека, град
Поліпропілен	450	40

Для горизонтального шнека пасивна область цілком розміщується на шнеку за умови  $S/D \leq 1$ . У нашому випадку ця умова задовольняється, так як  $S/D=0,462$ . Отже, може бути застосована формула для коефіцієнта продуктивності [1]:

$$\varphi_n = 0,87 \cdot [1 - 0,237 \left(\frac{S}{D}\right)^2] = 0,87 \cdot [1 - 0,237 \left(\frac{3,2 \cdot 10^{-2}}{3,8 \cdot 10^{-2}}\right)^2] = 0,724. \quad (2.22)$$

Секундна продуктивність

$$Q^c = \frac{S}{D} \cdot R^3 \cdot \omega \cdot \varphi_n \quad (\text{м}^3/\text{с}), \quad (2.23)$$

де  $\omega$  – швидкість обертання шнекового дозатора (рад / с).

Продуктивність шнекового дозатора прямо пропорційна швидкості обертання шнека, а коефіцієнт шнекового дозатора – це коефіцієнт пропорційності між швидкістю і накопиченням маси в бункері, який може бути розрахований за формулою

$$K_{\text{ш}} = \frac{S}{D} \cdot R^3 \cdot \varphi_n \cdot \gamma_0 = \frac{3,2 \cdot 10^{-2} \cdot (1,9 \cdot 10^{-2})^3 \cdot 0,724 \cdot 450}{3,8 \cdot 10^{-2}} = 0,0019, \quad (2.24)$$

де  $\gamma_0$  - насипна об'ємна маса матеріалу.

### **2.3. Математична модель шнекового дозатора із змінними характеристиками сипучого середовища**

У техніці до сипучих матеріалів відносяться матеріали, які допускають транспортування і зберігання навалом. Термін «сипучі» використовують для більшості матеріалів, що складаються з частинок певних розмірів: пилоподібних, порошкоподібних, зернистих і кускових. Обсяг сипучого матеріалу складається з різних за формою і розмірами обсягів дотичних твердих частинок і пустот між ними, заповнених повітрям або водою. Частинки, які утворюють структуру (скелет) сипучого матеріалу, мають один з одним різний зв'язок, що залежить від розміру часток, їх форми, вологості і т.ін. Як правило, більшість сипучих матеріалів мають складний фракційний склад і являють собою сукупність часток з випадковим нерегульованим розташуванням.

У системах дозування, коли основним критерієм є точність дозування, шнекові дозатори мають незаперечну перевагу перед іншими видами транспортування сипучих матеріалів [37-39]. Необхідна точність дозування досягається за рахунок регулювання швидкості в момент зупинки шнека. Синтез системи управління ведеться з урахуванням відомої інформації про обсяг порції матеріалу, переміщуваного в бункер дозатора. Однак пріоритет точності дозування позначається на продуктивності шнекового дозатора, яка прямо пропорційна швидкості обертання шнека. Тому при налаштуванні системи регулювання необхідно домогтися оптимального співвідношення точності дозування і продуктивності шнекового дозатора. На етапі проектування, облік коефіцієнтів, що характеризують точність дозування і продуктивність, необхідно проводити на математичній моделі.

Продуктивність шнекового дозатора знаходиться за формулою [1]

$$Q = \frac{60 \cdot \pi \cdot D^2}{4} \cdot S \cdot n \cdot c \cdot \gamma \cdot \Psi \quad (2.25)$$

де  $D$  - зовнішній діаметр гвинта шнека, м;

$S$  - крок гвинта шнека, м;

$n$  - кутова швидкість обертання валу, об/хв;

$c$  - коефіцієнт, що враховує вплив кута нахилу осі шнека до горизонту на його продуктивність;

$\gamma$  - насипна вага матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$\Psi$  - коефіцієнт наповнення корпусу шнека.

Продуктивність ШД пропорційна: діаметру гвинта  $D$ , кроку гвинта  $S$ , кутової швидкості обертання шнека  $n$ , а також залежить від параметрів матеріалу, що транспортується, коефіцієнта заповнення шнека  $\Psi$  і насипної ваги  $\gamma$ . На продуктивність шнекового дозатора впливає і просторове положення шнека, тобто коефіцієнт, що враховує вплив кута нахилу осі шнека до горизонту.

Нахил шнекового дозатора значно знижує продуктивність роботи. Наприклад, при нахилі 45% продуктивність знижується на 30% [1]. На стадії проектування шнека можна скорегувати продуктивність шляхом підбору співвідношень  $S/D$  при явному нахилі або в залежності від матеріалу. Коефіцієнт наповнення жолобу для різних матеріалів лежить в діапазоні від 0,45 до 0,2 і прямо пропорційний розміру гранул.

Зміна вологості навколишнього середовища теж є фактором нестабільності системи дозування сипких матеріалів, так як. Змінюються коефіцієнт заповнення жолоба і об'ємна вага переміщуваного матеріалу.

Питома вага для конкретного сипучого матеріалу не має постійного значення. Коливання об'ємної ваги і коефіцієнта заповнення жолоба залежать від гранулометричного складу матеріалу: розмірів частинки, наявності частинок різної величини в загальній кількості матеріалу, його вологості і т.ін. На коефіцієнт заповнення жолоба впливає швидкість обертання валу і довжина забірної частини гвинта. При певній швидкості обертання валу і забірної частини гвинта ( $l_3$ ) можна домогтися максимального значення коефіцієнта (для різних видів матеріалів максимальне значення буде різним).

Таблиця 2.2 – Коефіцієнт заповнення  $\Psi$  в залежності від виду переміщуваного матеріалу

Вантаж	$\Psi$
Легкий, невеликий, сипучий, неабразивний; насипна щільність $\rho_n = 480 \dots 640 \text{ кг/м}^3$ (кальцинована сода, порошкове вапно)	0,4
Середньої ваги, неабразивний, дрібнозернистий; $\rho_n = 640 \dots 800 \text{ кг/м}^3$	0,4
Малоабразивний, зернистий або дрібнокусковий; $\rho_n = 640 \dots 1200 \text{ кг/м}^3$ (сіль)	0,3
Абразивний, дрібнокусковий, перемішаний з пилом; $\rho_n = 800 \dots 1600 \text{ кг/м}^3$ (кускове вапно, гіпс, сланець)	0,25
Високоабразивний, кусковий або в'язкий (флотаційний колчедан, недогарок і т.ін.)	0,125

Коефіцієнт заповнення  $\Psi$  можна вибрати залежно від виду переміщуваного матеріалу по табл. 2.2. [1]

Продуктивність шнекового дозатора залежить від швидкості обертання валу приводного двигуна, вологості повітря, гранулометричних властивостей матеріалу, а також від кута нахилу шнека (див. рис. 2.6). При незначному збільшенні вмісту води в речовині продуктивність збільшується. Продуктивність при похилому переміщенні матеріалу зменшується, що пов'язано зі значним зменшенням коефіцієнта заповнення. У формулу розрахунку продуктивності введений поправочний коефіцієнт  $c$ . Залежність коефіцієнта  $c$  від нахилу шнека приведена в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Залежність коефіцієнта продуктивності  $c$  від нахилу конвеєру

	$\alpha$ , град						
	0	5	10	15	20	30	45
$c$	1	0,9	0,8	0,7	0,65	0,5	0,35

Так як при  $\alpha=0^\circ$  досягається максимальна продуктивність, оптимальним можна вважати горизонтальне розташування шнека.

Не слід збільшувати швидкість обертання гвинта, особливо при транспортуванні абразивних, твердих і кускових матеріалів. Збільшення швидкості обертання гвинта викликає підвищений знос гвинта і жолобу, подрібнення частинок матеріалу, зростання енерговитрат і нерівномірне переміщення матеріалу. Максимально допустимі швидкості для транспортування різних матеріалів наведені в табл. 2.4. [1]

Таблиця 2.4 – Максимально допустима швидкість транспортування

Найменування матеріалу	$n_{\max}$ , об/хв
Продукти помелу (вугільний пил, борошно, зола, цемент, гіпс)	120
Землисті або зерністі (зерно, тирса, пісок, гранульовані шлаки)	120
Дрібношматкові неабразивні (вапняна порода)	100
Дрібношматкових абразивні (сірка, руда, суха глина)	80
Липкі і тістоподібні (вологий цукор, цементний розчин, борошняне тісто)	60

Потужність приводу гвинтового конвеєра витрачається на подолання опорів переміщенню матеріалу:

- 1) тертя матеріалу об жолоб;
- 2) тертя матеріалу об гвинт;
- 3) тертя в упорних і підвісних підшипниках;
- 4) опори, що виникають внаслідок скупчення матеріалу у проміжних підшипників, а також в результаті перемішування і подрібнення матеріалу при його переміщенні;
- 5) втрати на тертя в двигуні.

Деякі значення коефіцієнта опору при використанні різних матеріалів представлені в табл. 2.5 [1].

Таблиця 2.5 – Залежність коефіцієнта опору транспортуванню від матеріалу

Матеріал	$k_c$
Зернисті вантажі	1,5-1,6
Борошністі і пухкі харчові вантажі	1,2-1,3
Кускові, дрібноабразивні вантажі	1,4-1,6
Важкі, кускові і абразивні вантажі	1,8-2,0
Дрібнозерниста сіль	4,0

Об'єм бункера дозатора визначається за формулою

$$V = \frac{m}{\gamma} \text{ (м}^3\text{)}, \quad (2.20)$$

У разі, коли бункери дозатора виконуються у вигляді куба, висота бункера визначається за формулою

$$h_b = \sqrt[3]{V} \text{ (м)}. \quad (2.21)$$

Висоту падаючого стовпа при переміщенні матеріалу з шнека в бункер можна визначити за формулою

$$h_a = \frac{g \cdot t^2}{2} \text{ (м)}, \quad (2.22)$$

де  $t$  - час падіння матеріалу в бункер дозатора.

Для експериментальної установки відстань від краю шнека до дна бункера дозатора дорівнює 0,535 м:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot h_6}{g}} = 0,33 \text{ (с)}. \quad (2.23)$$

Як видно з виразу (2.29), значення часу залежить від висоти падіння матеріалу. Дану висоту можна розбити на дві ділянки (рис. 2.7):

$$h = h_0 + h_6, \quad (2.30)$$

де  $h_0 = \text{const}$  - відстань від шнека до верхньої межі бункера;

$h_6$  - відстань від рівня матеріалу в бункері до його верхньої межі.

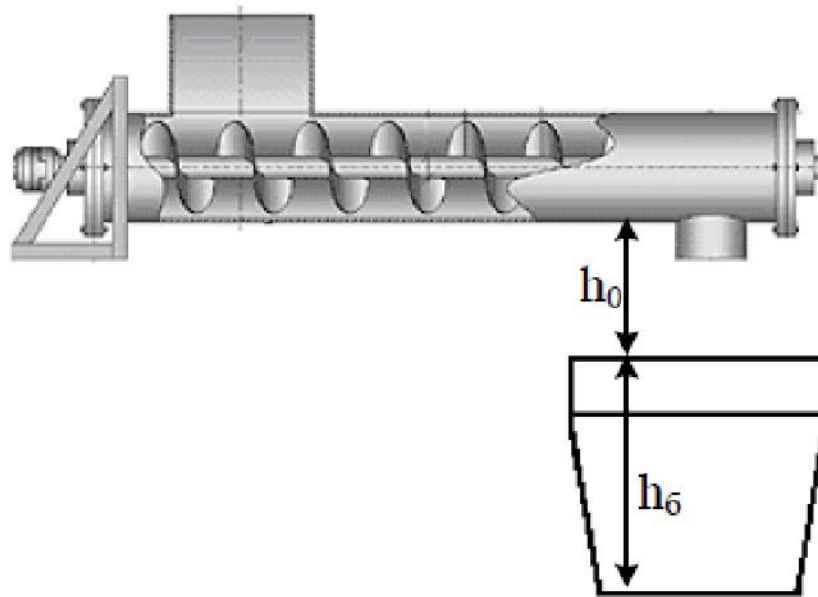


Рисунок 2.7 – Висота падіння дозуемого матеріалу в бункер

Можливі два шляхи знаходження залежності між масою і висотою. Перший – експериментальний. При різних завданнях маси дозування вимірюємо висоту  $h_6$  і по декількох точках будуємо залежність. Даний спосіб має велику точність, але рідко застосовується через технологічні фактори. Другий спосіб – аналітичний. Для бункерів різних форм залежність висоти  $h_6(m)$  різна. Розглянемо залежності для різних форм бункерів.

1. Бункер має форму паралелепіпеда (рис. 2.8).

Об'єм даного бункера знаходиться як

$$V = a \cdot b \cdot c. \quad (2.31)$$

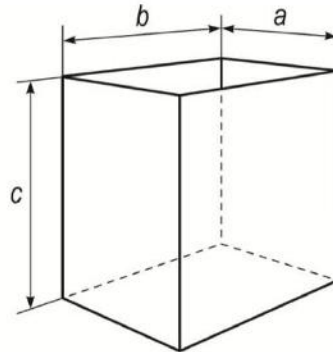


Рисунок 2.8 – Прямокутна форма бункера

Об'єм матеріалу в бункері

$$V_{\text{пар}} = \frac{m}{\gamma}. \quad (2.32)$$

Звідси висота знаходиться за виразом

$$h_0 = c = \frac{V_{\text{пар}}}{a \cdot b}. \quad (2.33)$$

2. Бункер має форму усіченої чотирикутної піраміди, що має в основі квадрат (рис. 2.9).

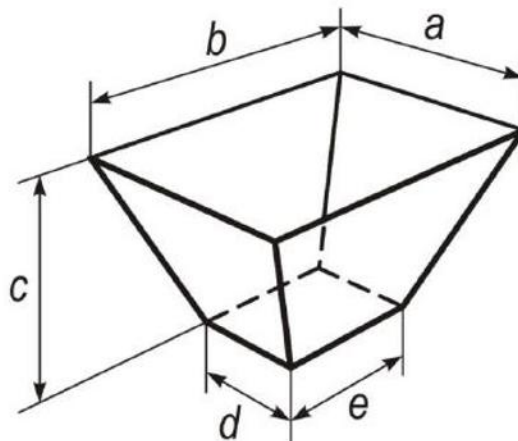


Рисунок 2.9 – Трапецеїдальна форма бункера

Об'єм даного бункера знаходиться як

$$V_{\text{мпр}} = \frac{1}{3} \cdot c \cdot (d \cdot e + \sqrt{d \cdot e \cdot a \cdot b} + a \cdot b). \quad (2.34)$$

Звідси висота дорівнює

$$h_6 = c = \frac{V_{\text{мпр}} \cdot 3}{(d \cdot e + \sqrt{d \cdot e \cdot a \cdot b} + a \cdot b)}. \quad (2.35)$$

Бункери, мають складну форму (рис. 2.10), слід розбивати на найпростіші складові форми, описані вище, і складати залежність  $h_6(m)$  з окремих ділянок

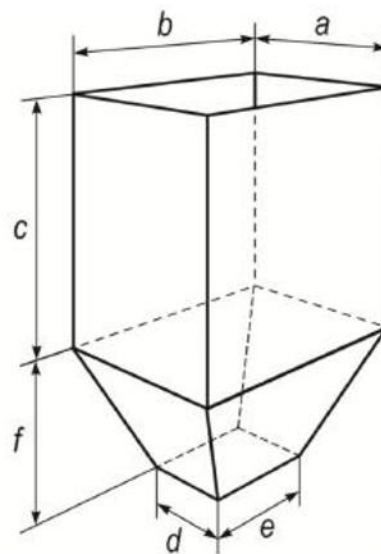


Рисунок 2.10 Бункер складної форми

Висота падіння матеріалу в бункер складеної форми знаходиться як:

$$h_6 = c + f$$

$$h_6 = \frac{V_{\text{мпр}}}{a \cdot b} + \frac{V_{\text{мпр}} \cdot 3}{(d \cdot e + \sqrt{d \cdot e \cdot a \cdot b} + a \cdot b)} \quad (2.36)$$

З урахуванням всіх розрахунків складемо модель механічної системи електроприводу (рис. 2.11).

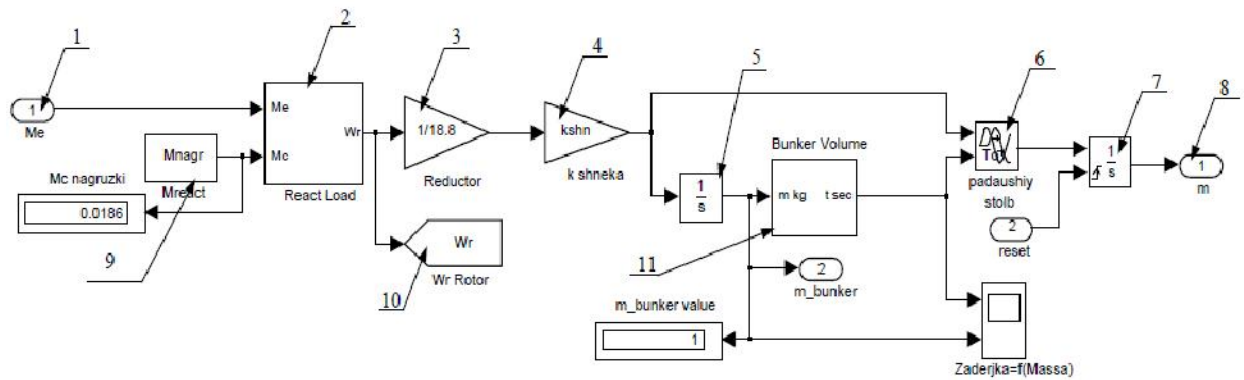


Рисунок 2.11 – Імітаційна модель механічної системи

Основними елементами імітаційної моделі механічної системи в середовищі MATLAB Simulink є:

1 - вхідний сигнал в механічну підсистему, що представляє собою електромагнітний момент двигуна;

2 - блок, що враховує реактивний момент опору в механічній системі;

3 - блок, що враховує передавальне число редуктора;

4 - блок, що враховує коефіцієнт передачі шнекового дозатора;

5 - блок інтегратора, що характеризує накопичувальну масу матеріалу в бункері без тимчасової затримки;

6 - блок, що враховує затримку при падінні матеріалу;

7 - блок інтегратора, що характеризує накопичувальну масу матеріалу в бункері: вхід Reset необхідний для скидання величини маси матеріалу, щоб зробити наступний цикл дозування;

8 - вихід механічної підсистеми у вигляді маси, накопиченої в бункері-дозаторі при поточному процесі дозування;

9 - приведенний момент опору на валу;

10 - вихід механічної підсистеми у вигляді швидкості двигуна;

11 - блок, що враховує залежність затримки часу падіння матеріалу від маси, накопиченої в бункері.

Функціональне призначення блоку 11 реалізується виходячи з геометричних розмірів бункера (рис. 2.12).

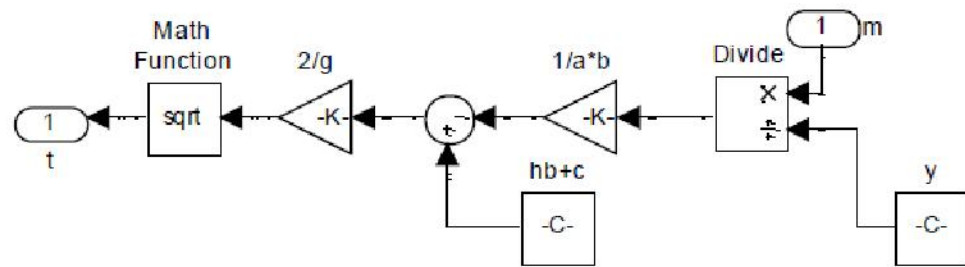


Рисунок 2.12 – Підсистема блоку 11 механічної системи

Блок механічної системи, що враховує реактивний момент опору, показаний на рис. 2.13 [34].

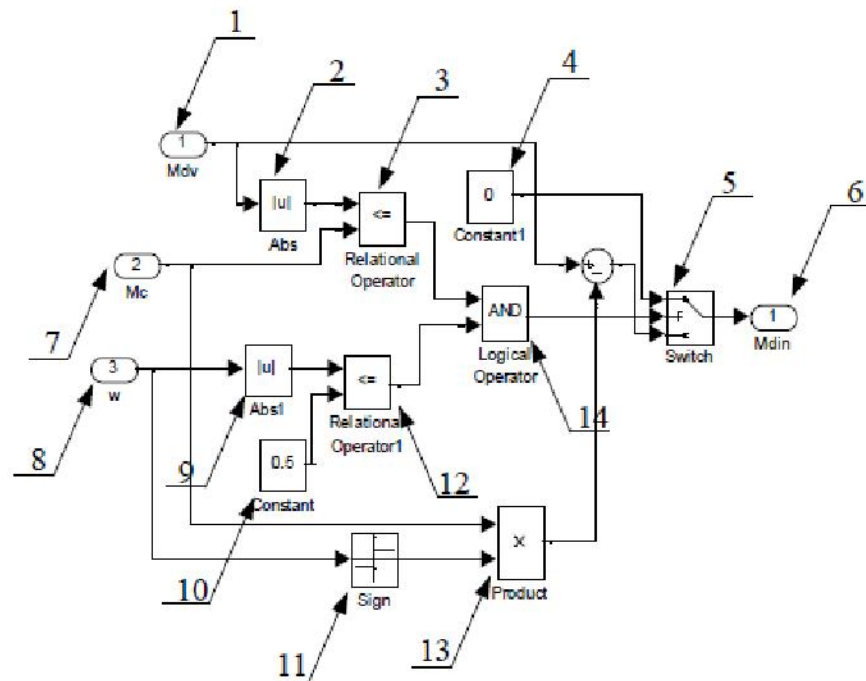


Рисунок 2.13 – Модель механічного навантаження типу сухого тертя в підсистемі середовища Simulink

Функціональне призначення основних блоків підсистеми (рис. 2.13) наступні: блоки 1, 7, 8 є входи підсистеми: 1 - електромагнітний момент двигуна; 7 - величина моменту опору типу сухого тертя на валу першої маси; 8 - швидкість двигуна. Блок 6 є виходом даної підсистеми. Блоки 11, 13 враховують величину і знак моменту опору в залежності від напрямку обертання валу двигуна. Група блоків 2, 3, 4, 5, 9, 10, 12, 14 реалізує три зони

при зміні моменту опору на його релейного характеристики. У першій зоні момент опору дорівнює -  $M_c$ , у другій  $M_c = 0$ , в третій зоні момент опору дорівнює  $M_c$ .

#### 2.4. Модель падаючого стовпа сипких матеріалів

Падаючий стовп містить певну масу дозованого матеріалу, яка збільшує підсумкову величину помилки дозування. Для зменшення впливу маси падаючого стовпа на точність дозування необхідно визначити масу падаючого стовпа і провести корекцію величини завдання.

Щоб визначити масу падаючого стовпа, необхідно знати насипну щільність дозуемого матеріалу, діаметр і висоту падаючого стовпа. Насипна щільність – це відношення маси продукту до його об'єму в насипному стані. [16].

Знаючи геометричні розміри бункера, відстань від шнека до бункера і щільність матеріалу, можна визначити висоту падаючого стовпа, використовуючи вирази (2.33) для бункера у вигляді куба.

Маса матеріалу в бункері визначається за формулою

$$m = \gamma \cdot V, \quad (2.37)$$

Заповнений обсяг бункера визначається як

$$V = a \cdot b \cdot h_m, \quad (2.38)$$

де  $h_m$  - висота в бункері, заповнена матеріалом.

Маса дозуемого матеріалу – технологічний параметр, який вимірюється за допомогою трьох тензодатчиків і підсумовується в стандартний струмовий нормований сигнал, що надходить в систему управління на вхід програмно виконаного регулятора ваги.

Підставивши (2.38) в (2.37), шляхом нескладних математичних перетворень отримаємо висоту в бункері, заповнену матеріалом:

$$h_m = \frac{m}{\gamma \cdot a \cdot b}. \quad (2.39)$$

Для бункера у вигляді усіченої піраміди (рис. 2.9), що має в основі квадрат,

$$h_{m1} = \frac{m \cdot 3}{\gamma \cdot c \cdot (d \cdot e + \sqrt{d \cdot e \cdot a \cdot b} + a \cdot b)}. \quad (2.40)$$

Для бункерів складної форми (рис. 2.10) висота сипучого матеріалу в бункері знаходиться як

$$h_{m2} = h_m + h_{m1}. \quad (2.41)$$

Тоді висота падаючого стовпа буде визначатися як

$$h_{ст} = h_0 + (h_6 - h_m). \quad (2.42)$$

Нехтуємо утворенням конусного насипу при процесі дозування, вважаючи, що матеріал рівномірно розподілений по площі бункера приймача.

Площу поперечного перерізу падаючого стовпа знайдемо виходячи з геометричних розмірів лопаті шнека. Прийнемо площу поперечного перерізу рівній площі робочої поверхні кінцевого витка шнека [18 - 20].

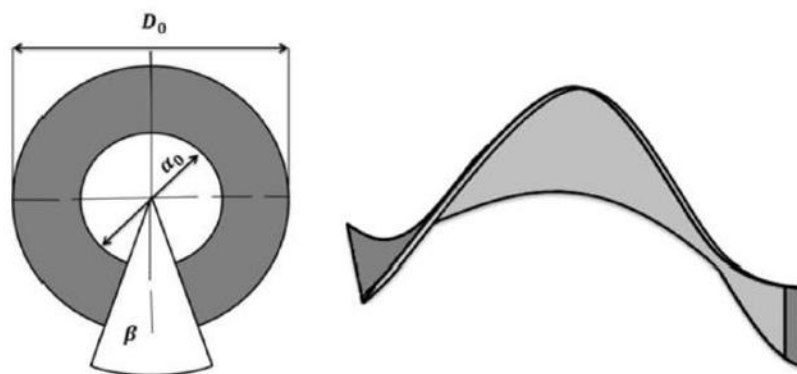


Рисунок 2.14 – Вид лопаті і витка шнека

Як показано на рис. 2.14, виток має зовнішній і внутрішній діаметр, площу визначаємо за формулою

$$S_{ст} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_0^2 - d_0^2). \quad (2.43)$$

За допомогою табл. 2.5 визначаємо насипну вага конкретного дозуемого матеріалу і знаходимо масу падаючого стовпа:

$$m_{ct} = S_{ct} \cdot h_{ct} \cdot \gamma. \quad (2.44)$$

Отриманий вираз маси падаючого стовпа дозволяє в режимі реального часу відслідковувати зміну маси матеріалу, що знаходиться в повітрі.

Динамічно змінюється тимчасова затримка падіння матеріалу в бункер дозатора при накопиченні матеріалу в бункері розраховується з урахуванням формули 2.29 наступним чином:

$$t_{тз} = \sqrt{\frac{2 \cdot h_{ct}}{g}} \quad (2.45)$$

Імітаційна модель шнекового дозатора з урахуванням мінливої тимчасової затримки і обчисленням маси падаючого стовпа зображена на рис.2.15.

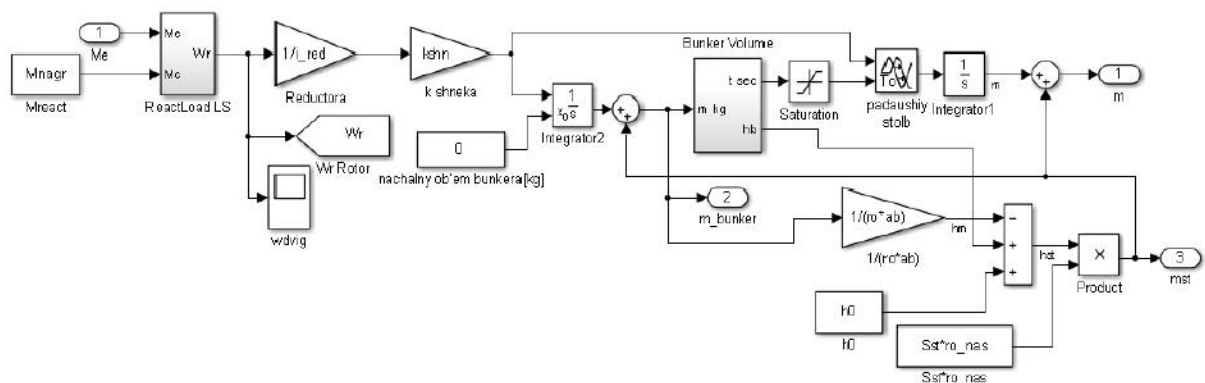


Рисунок 2.15. Модель шнекового дозатора з урахуванням часової затримки і обчисленням маси падаючого стовпа

Дана імітаційна модель відрізняється від відомих тим, що моделювання шнекового дозатора відбувається з урахуванням маси «падаючого стовпа» і тимчасової затримки, які безперервно змінюються в міру накопичення матеріалу різних властивостей в бункері.

## 2.5. Імітаційна модель електромеханічної системи дозування сипких матеріалів

На даному етапі розробки, поки не створена система управління з алгоритмами корекції помилки, буде використовуватися релейний регулятор ваги. Регулятор формує завдання, якщо вага в бункері менше заданого, і відключається при перевищенні ваги. У моделі (рис.2.16) використовуються субблоки асинхронного двигуна і механічної системи, розглянуті вище, а також блок, що імітує управління перетворювачем частоти  $U/f = \text{const}$ .

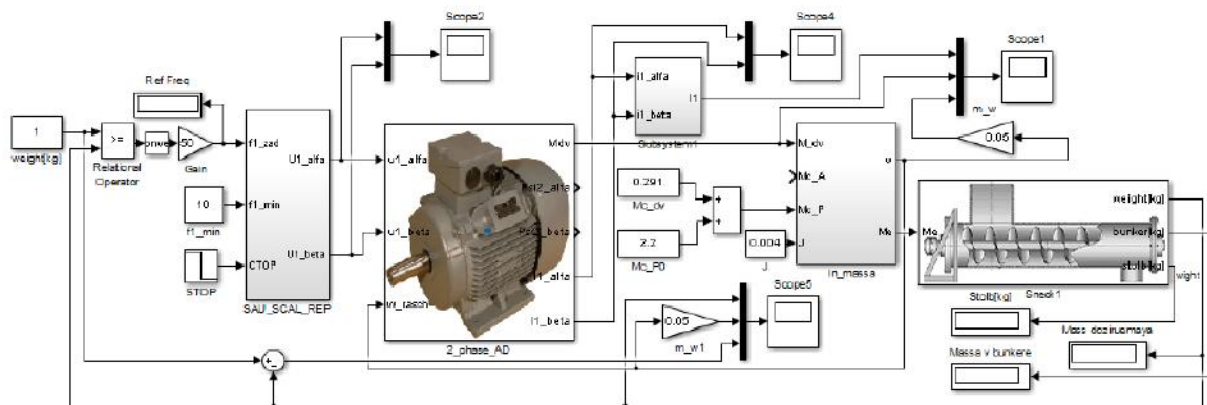


Рисунок 2.16 – Модель системи дозування сипких матеріалів з релейним регулятором ваги

На рис.2.17 представлені результати дозування 1 кг матеріалу на імітаційній моделі і на експериментальній установці при повністю ідентичних умовах. Можна зробити висновок, що складена математична модель дозування сипких матеріалів, має достатню адекватність, що підтверджує порівняння з фізичним процесом.

Як видно з графіка (рис. 2.17), має місце суттєва абсолютна помилка дозування 18,67%, яка категорично не припустима згідно з технологічними вимогами (помилка дозування  $\pm 3$ ) для приготування комбікорму. Щоб отримати необхідну точність, необхідно в системі управління частотним асинхронним електроприводом використовувати спеціальні алгоритми корекції помилки дозування.

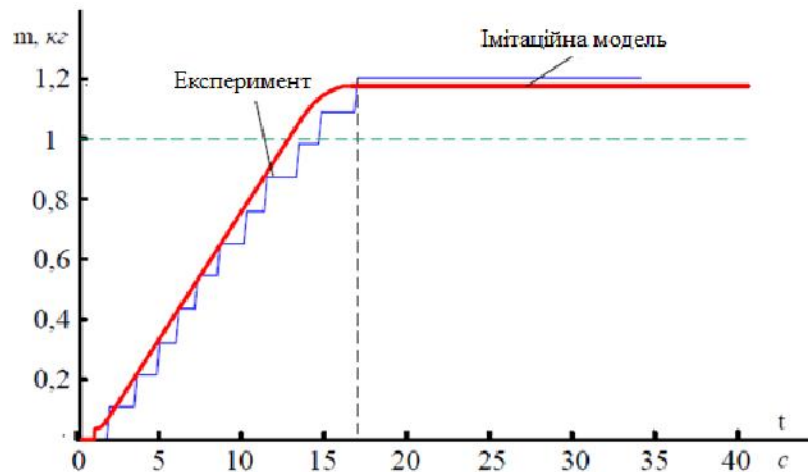


Рисунок 2.17 – Результати дозування 1 кг на імітаційній моделі на експериментальній установці

На точність технологічного процесу дозування сипких матеріалів істотно вплинули наступні фактори: кут нахилу шнекового дозатора до лінії горизонту, фізико-механічні властивості матеріалу, коефіцієнт заповнення корпусу шнека і т.ін.

За допомогою розробленої моделі електротехнічного комплексу дозування сипких матеріалів проведемо дослідження впливу різних чинників на точність і продуктивність системи дозування.

На рис.2.18 зображені перехідні процеси дозування гранул поліпропілену при куті розташування шнекового дозатора до лінії горизонту рівною  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  і  $30^\circ$ .

На графіку суцільна лінія це дозування поліпропілену при ідеальному розташуванні шнекового дозатора до лінії горизонту, а штрихованої лінія – дозування з нахилом до горизонту в  $15$  градусів і точкова – при куті нахилу шнекового дозатора в  $30$  градусів.

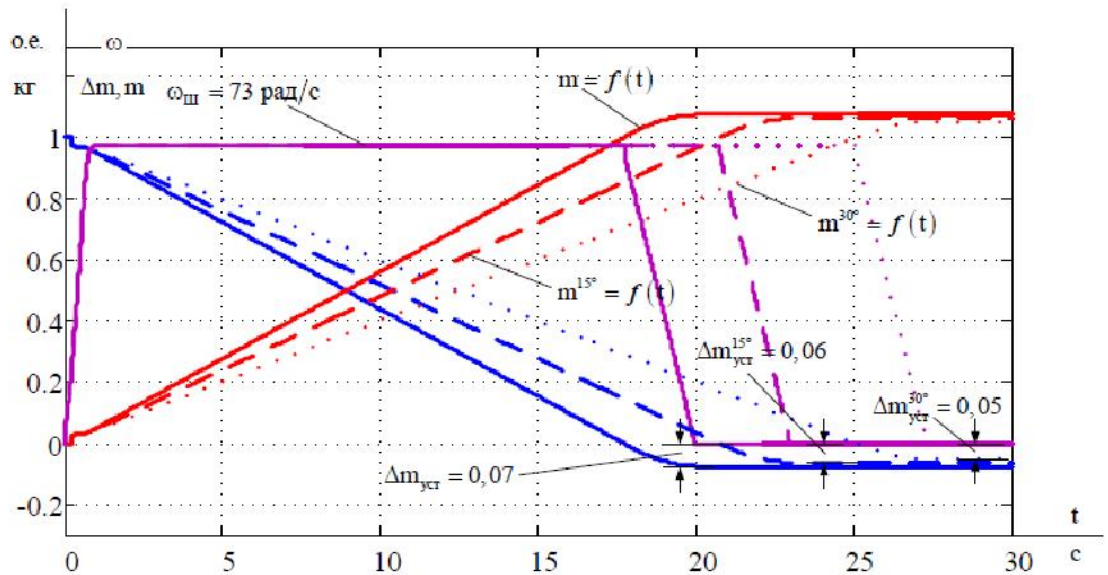


Рисунок 2.18 – Результати дозування поліпропілену при різних кутах нахилу шнекового дозатора до лінії горизонту з урахуванням перехідних процесів

Як видно з результатів моделювання, якщо дозування буде здійснюватися з нахилом шнека до лінії горизонту в  $30^\circ$ , то помилка дозування практично не зміниться, але продуктивність дозування при цьому зменшиться на 26%. Одним із завдань даної магістерської роботи є отримання максимальної якості суміші при найбільшій продуктивності її приготування. З формули (2.25) максимальну продуктивність дозування можна отримати при куті нахилу шнека  $\alpha=0^\circ$ . Синтез управління за допомогою спеціальних сигнальних алгоритмів корекції помилок дозування проводимо при горизонтальному положенні шнекового дозатора. Розглянемо вплив на якість дозування зміною фізико-механічних властивостей матеріалу. На рис.2.19 представлений перехідний процес дозування пшениці при різних кутах нахилу шнека.

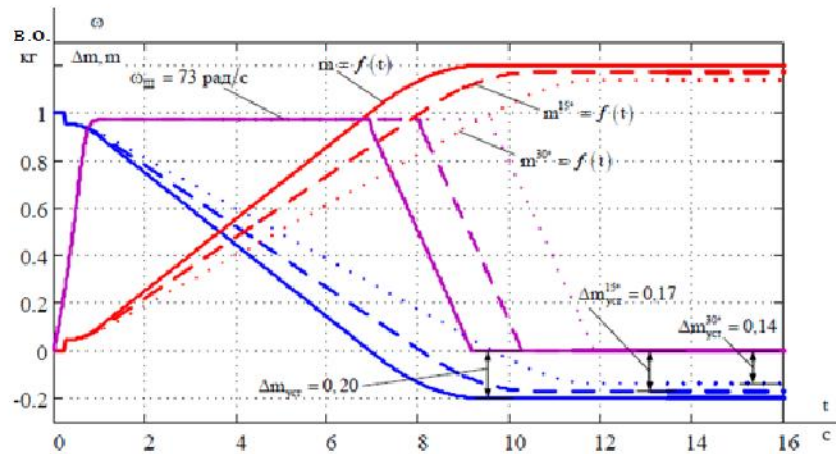


Рисунок 2.19. Результати дозування пшениці при різних кутах нахилу шнекового дозатора до лінії горизонту з урахуванням перехідних процесів

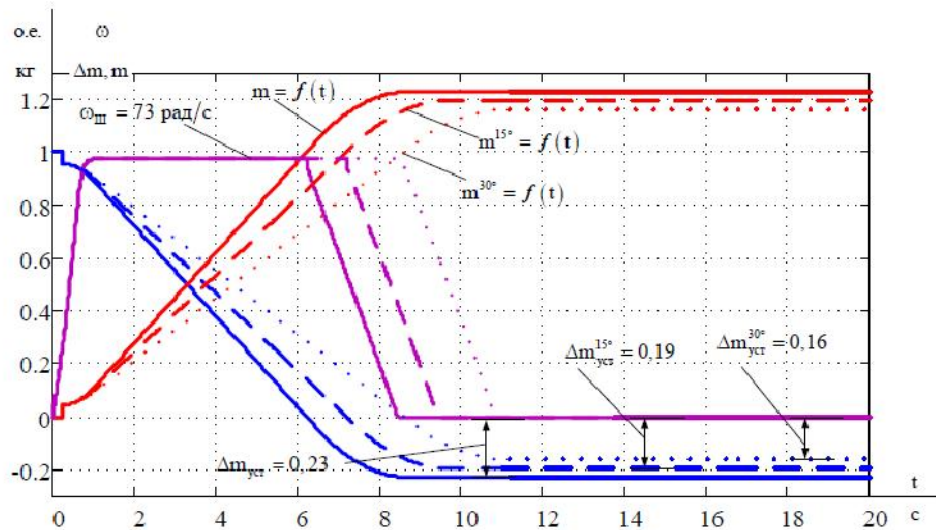


Рисунок 2.20. Результати дозування кукурудзи при різних кутах нахилу шнекового дозатора до лінії горизонту з урахуванням перехідних процесів

При збільшенні насипної об'ємної маси матеріалу на 60%, продуктивність шнекового дозатора збільшується на 185%, що обумовлено значним збільшенням коефіцієнта передачі шнекового дозатора в моделі, але відносна помилка дозування збільшується майже в 3 рази.

З результатів експериментів можна зробити висновок, що процес дозування «важких» вантажів супроводжується значною помилкою і застосування спеціальних алгоритмів корекції помилки найбільш актуально.

## Висновки по 2 розділу

1. Розроблено математичну і імітаційну моделі автоматизованого комплексу дозування з частотно-регульованим електроприводом шнека з урахуванням властивостей матеріалу, що змінюються і висоти «падаючого стовпа» в бункер дозатора. Запропоновано методику розрахунку коефіцієнта передачі шнекового дозатора.
2. Аналіз процесу дозування на імітаційній моделі показав, що горизонтальне розташування шнекового дозатора, з точки зору продуктивності, є найбільш оптимальним. При дозуванні матеріалів з більшою насипною об'ємною масою спостерігається збільшення помилки дозування.
3. Результати дозування, отримані на імітаційній моделі автоматизованого комплексу дозування з частотно-регульованим електроприводом з релейним регулятором ваги, відповідають реальному фізичному процесу. Встановлено, що помилка дозування матеріалу становить 18,67% при допустимій помилці регламенту приготування кормосумішей в 3%. Для підвищення точності дозування автоматизованого комплексу дозування частотно-регульованим електроприводом необхідно розробити і використовувати спеціальні алгоритми корекції помилок дозування.

### **3. СИНТЕЗ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ В СИСТЕМІ ДОЗУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ**

Рішення задачі оптимального дозування сипких матеріалів за критерієм точності і максимально можливої продуктивності багатокomпонентних сумішей пов'язано, перш за все, з формуванням алгоритму управління електроприводу шнекового дозатора. Алгоритм дозволить домогтися необхідної точності і оптимізувати час дозування.

Для синтезу алгоритму дозування використовуємо теорію цифрових регуляторів [21]. Вибір даного способу синтезу регуляторів обумовлений лідируючими позиціями цифрових систем управління в області АСУ ТП.

Крім того, такий підхід дозволить створити систему управління, оптимально використовує можливості застосовуваного процесора.

#### **3.1 Способи управління частотно-регульованим електроприводом дозування сипких матеріалів**

Більшість мобільних сільськогосподарських електрифікованих машин експлуатуються в тривалому (S1) і короткочасному (S2) режимі роботи, значно менше число – в повторно-короткочасному режимі (S3). Інші режими роботи зустрічаються вкрай рідко. Тривалий режим S1 характерний для дробарок, подрібнювачів, основної масі насосів, вентиляторів, центрифуг і компресорів. У короткочасному режимі S2 працюють роздавальники кормів на фермах, навозоприбиральні транспортери, порційні змішувачі кормів, деякі насосні і компресорні установки. Очевидно, що тривалість роботи механізму, що працює в короткочасному режимі, визначається технологічними характеристиками (стандартні  $t_p = 10, 30, 60, 90$  хв). У повторно-короткочасному режимі S3 працюють кранові механізми, вентилятори в

системах мікроклімату, насоси систем водопостачання, компресори з ресиверами і ін.

Специфіка електроприводів в сільськогосподарському виробництві визначається різноманітністю навантажувальних характеристик, режимами і умовами роботи (навколишнє середовище, якість електроенергії). Отже, особлива увага повинна приділятися вибору систем електроприводу, з метою забезпечення необхідних режимів роботи, а саме обґрунтування необхідності регулювання кутової швидкості електродвигуна і її діапазону.

Найбільшого поширення набули асинхронні двигуни загального призначення потужністю від 0,75 до 7,5 кВт, які складають більше половини всього парку сільськогосподарських комплексів.

З огляду на вимоги по точності дозування матеріалопотоків, складу сумішей, останнім часом стали активно впроваджуватися системи «перетворювач частоти - асинхронний двигун» (ПЧ-АД) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Вони забезпечують необхідну точність дозування і надійність системи.

У свою чергу, регулювання швидкості електроприводів з асинхронними двигунами виробляється зміною частоти і величини напруги живлення. Зміна частоти напруги на статорі включає в себе такі способи управління, як скалярне управління швидкістю за допомогою закону  $U/f$ , векторне управління, пряме керування моментом, бездатчикового управління швидкістю [17, 18]. При регулюванні необхідно управляти двома координатами електродвигуна: струмом і швидкістю.

Для оптимального управління асинхронним електродвигуном необхідно управляти вектором струму, вектором потокозчеплення і швидкістю. Тоді характеристики електроприводу наближаються до характеристик двигуна постійного струму.

Однак управління вектором потокозчеплення пов'язано зі складністю отримання сигналу зворотного зв'язку по потокозчепленню, так як в серійних двигунах відсутні датчики потокозчеплення. З цієї причини потокозчеплення

обчислюється «спостерігачами», які використовують рівняння математичної моделі двигуна.

Для управління координатами електроприводу, як правило, використовують методи підпорядкованого регулювання, які дозволяють управляти координатою і виробляти її обмеження.

Сучасні розробки в області нових алгоритмів керування асинхронним електроприводом змінного струму являють собою подальший розвиток і вдосконалення класичного алгоритму і реалізуються на основі загальної теорії автоматичного управління [19-21]. Наприклад, застосування нейронних мереж і нечіткої логіки дозволило створювати ефективні регулятори [22, 23], які дають можливість ефективно управляти об'єктом регулювання.

Системи з нечіткими регуляторами і нейронними мережами рекомендується використовувати в наступних випадках:

- для управління складними технологічними процесами, коли існують проблеми їх ідентифікувати;
- коли повинна проводитися обробка лінгвістично сформульованих експертних знань [23].

Якщо управління може бути здійснено за допомогою методів класичної теорії автоматичного управління та/або існує формалізована і адекватна математична модель даної системи, застосування нечітких регуляторів і нейронних мереж не рекомендується.

Алгоритм векторного керування не застосуємо для управління шнековими дозаторами так як, в автоматизованому комплексі дозування сипких матеріалів спільний перетворювач частоти управляє декількома шнековими дозаторами.

Для управління приводного двигуна шнекового дозатора може бути застосовано скалярний управління, яке дозволить використовувати загальний перетворювач частоти для декількох шнеків-дозаторів і не вимагає складних налаштувань.

З урахуванням особливостей технологічного процесу і обраних принципів управління можна сформулювати вимоги до електроприводу шнекового дозатора:

- режим роботи: повторно-короткочасний;
- максимальна кутова швидкість:  $\omega = 15,60$  Рад / с;
- сигнал управління на вході електроприводу: цифро-аналоговий;
- електропривод і всі його елементи розташовуються в приміщенні з наступними умовами: температура навколишнього середовища від 5 до 30 °С; відносна вологість не більше 80% (при температурі +25 °С);
- перетворювач встановлюється в шафі. Необхідна ступінь захисту електродвигуна від зовнішніх впливів - IP44.

### **3.2 Методика синтезу цифрового регулятора ваги в електромеханічній системі**

Сучасні цифрові системи управління реалізовані на основі мікроконтролерів, сигнали в яких представляються дискретним за рівнем і часу набором даних. Одним з найбільш значущих переваг цифрової системи управління – це можливість її перенастроювання програмним способом (редагуванням програми мікроконтролера).

Для обробки дискретних даних необхідно використовувати цифрові регулятори, які мають більш високу якість управління в порівнянні з аналоговими регуляторами [4].

Синтез регулятора необхідно розпочати з визначення структури об'єкта управління. Розглянемо задачу в загальному вигляді.

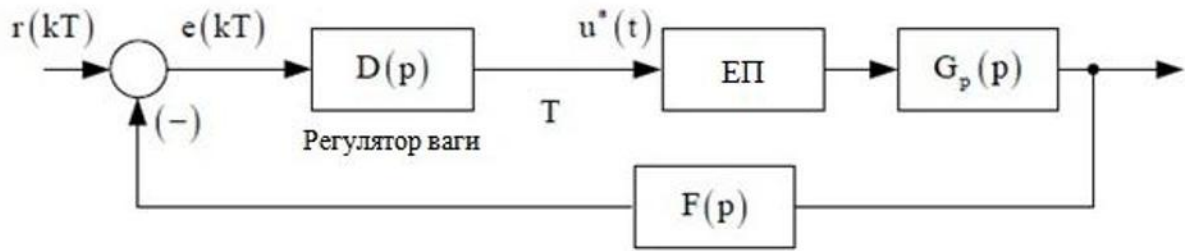


Рисунок 3.1 – Структурна схема електроприводу з регулятором ваги

$D(p)$  - передавальна функція регулятора ваги;  $ЕП$  - передавальна функція електроприводу;  $G_p(p)$  - передавальна функція об'єкта керування;  $F(p)$  - передавальна функція вимірювальної системи.

Для синтезу алгоритму управління необхідно перевести всі безперервні передавальні функції в дискретну область за допомогою  $z$ -перетворення. Схема на рис. 3.1 перетворюється (рис. 3.2)

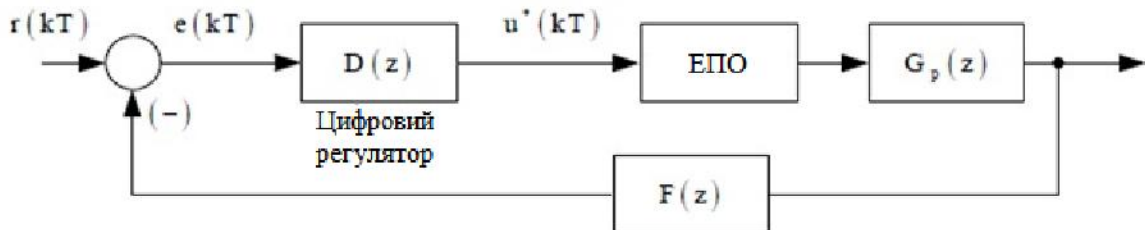


Рисунок 3.2 – Структурна схема цифрової системи управління в дискретному поданні

Для синтезу регулятора представимо модель АД у вигляді аперіодичної ланки першого порядку [32]. Еквівалентна постійна часу знаходиться як

$$T_{\text{э}} = \frac{x_{1H} + x'_{2H}}{\omega_{0\text{э}} \cdot R_2} + J_{\text{э}} \quad (3.1)$$

Перехідний процес АД і еквівалентної аперіодичної ланки має вигляд, представлений на рис. 3.3.

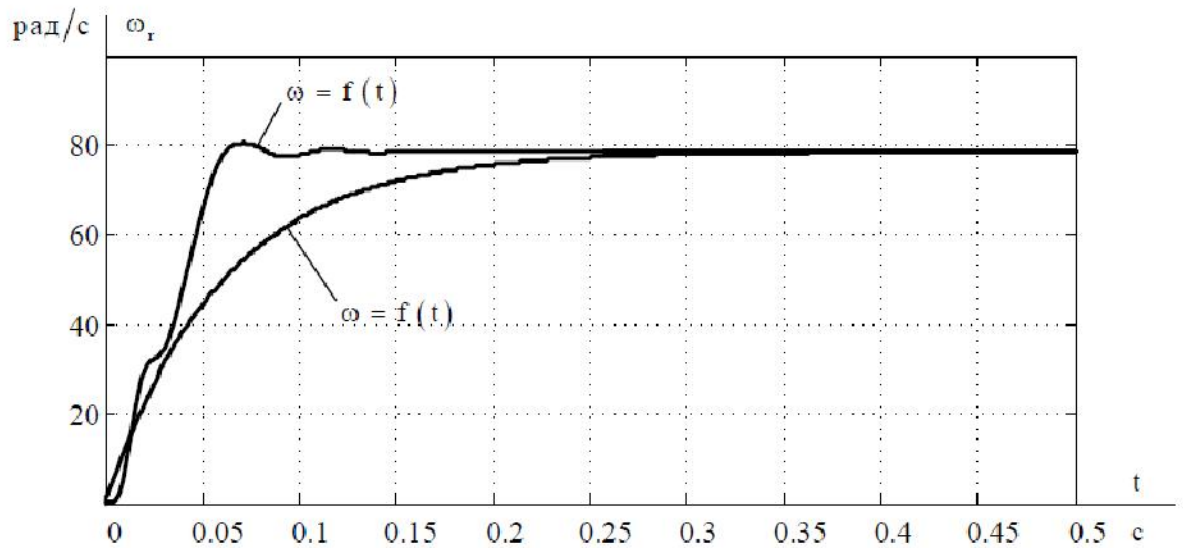


Рисунок. 3.3 – Перехідний процес АД і еквівалентної аперіодичної ланки

Передавальну функцію шнекового дозатора представимо інтегруючим ланкою з коефіцієнтом передачі шнека. Структурна схема системи показана на рис. 3.4.

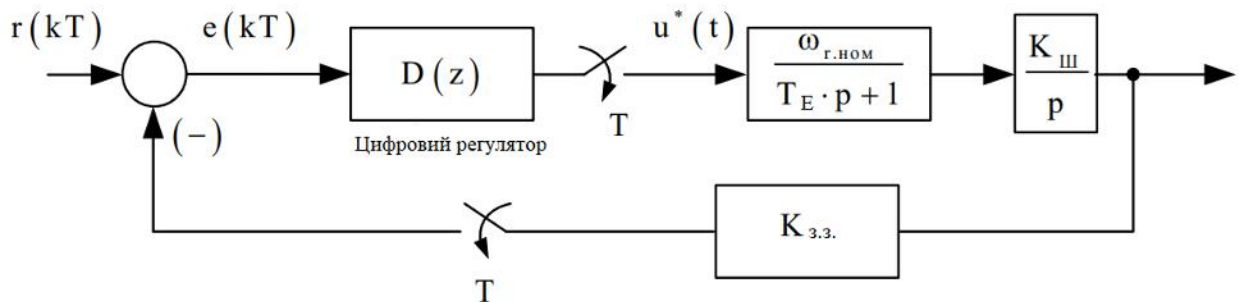


Рисунок 3.4 – Структурна схема системи управління та об'єкта регулювання

Відображення постійного числа в дискретній області дорівнює оригіналу в безперервній області. Отриманий контур містить аперіодичну ланку першого порядку і інтегруючу ланку, тому настроювання можна зробити з допомогою П-регулятора [19]:

$$D(z) = k_{\text{пер}} = \frac{1}{a \cdot T_3 \cdot K_{\text{III}} \cdot K_{\text{oc}}}, \quad (3.2)$$

де  $a$  - коефіцієнт настройки регулятора. Для здійснення перехідного процесу без перерегулювання (настройка на лінійний оптимум)  $a = 4$ .

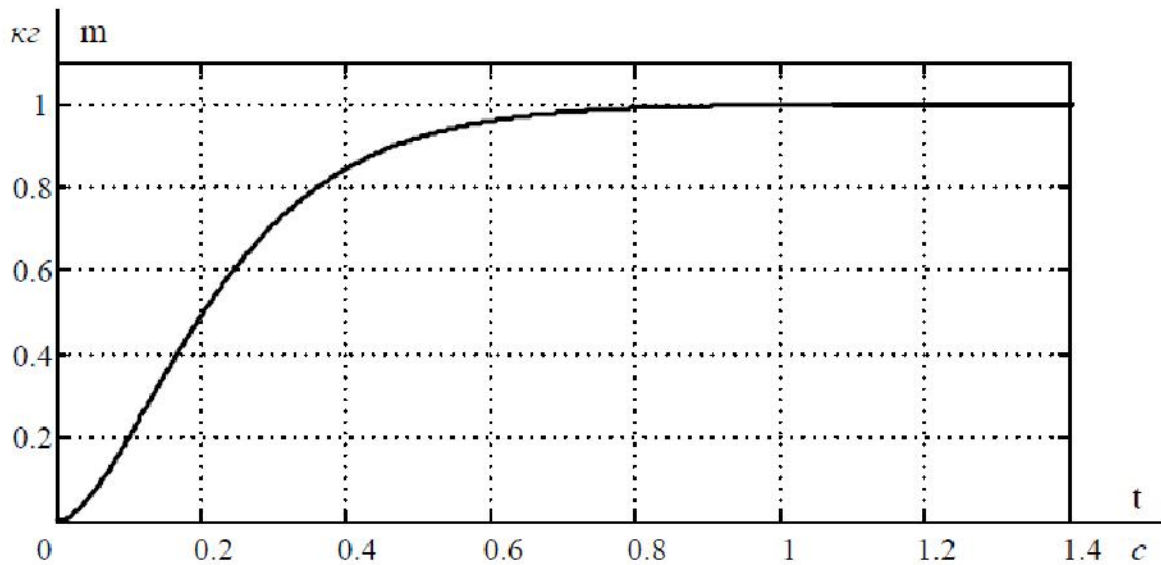


Рисунок 3.5 – Перехідний процес оптимізованої системи

З рис.3.5 видно, що перехідний процес дозування відбувається без перерегулювання за час, що дорівнює  $3 \dots 4 T_E$ .

Під час налаштування регулятора не було враховано затримку часу «падаючого стовпа» матеріалу в бункер. Затримка змінюється в залежності від заповнення бункера. Для компенсації помилки, що виникає при дозуванні, необхідний додатковий алгоритм адаптації.

### 3.3 Синтез регулятора ваги на основі модульного оптимуму

У системах дозування будь-яке перерегулювання перехідного процесу є перевагою, що позначається на точності дозування, тому його необхідно виключити, застосовуючи настройки з перерегулюванням, рівним нулю.

Розімкнутий контур ваги, налаштований на модульний оптимум, повинен мати наступну передавальну функцію [19]:

$$W_{\text{мо}}(p) = \frac{1}{4 \cdot T_{\mu\text{в}} \cdot p(T_{\mu\text{в}} \cdot p + 1)}, \quad (3.3)$$

де  $T_{\mu\text{и}}$  - мала постійна часу контуру ваги.

Приймаємо малу некомпенсуєму постійну контуру ваги рівну величині транспортної затримки шнекового дозатора, яка розрахована за формулою (2.45) для незаповненого бункера-дозатора експериментальної установки

$$T_{\mu\text{в}} = T_{\text{тз}} = 0,33 \text{ с.}$$

Постійна часу транспортної затримки на  $T_{\text{тз}}$  в контурі регулювання ваги на порядок більше, ніж в регульованому електроприводі. Тому в даній САР, регульований привід можна уявити пропорційною ланкою.

$$k_{\text{рзп}} = \frac{\omega_{\text{макс}}}{U_{\text{рв макс}}} = \frac{149}{10 \cdot 9,55} = 1,56.$$

Передавальна функція розімкнутого контуру ваги (рис. 3.6) даної системи визначається наступним чином [19]:

$$W_{\text{разкв}}(p) = W_{\text{рв}}(p) \cdot k_{\text{рзп}} \cdot \frac{k_{\text{ш}}}{p} \cdot \frac{1}{1 + T_{\text{тз}} \cdot p}. \quad (3.4)$$

Структурна схема контуру ваги представлена на рис. 3.6.

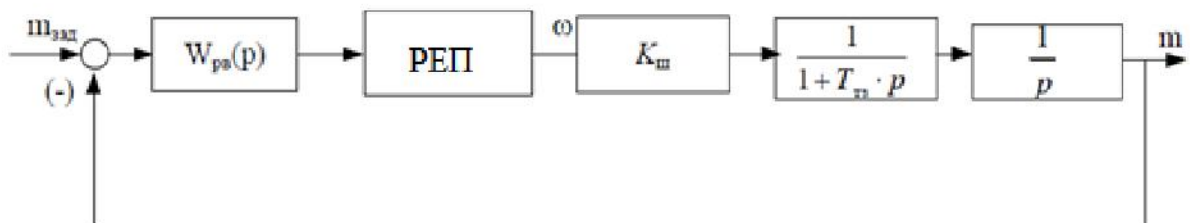


Рисунок 3.6 – Структурна схема лінеаризованого контуру ваги

Передавальну функцію розімкнутого контуру ваги прирівнюємо до бажаної передавальної функції і знаходимо передавальну функцію регулятора ваги.

$$W_{\text{рв}}(p) = \frac{(T_{\text{гз}} \cdot p + 1)}{k_{\text{ш}} \cdot k_{\text{рзп}} \cdot 2 \cdot T_{\text{мв}} \cdot (T_{\text{мв}} \cdot p + 1)} = \frac{1}{k_{\text{ш}} \cdot k_{\text{рзп}} \cdot 4 \cdot T_{\text{мв}}}, \quad (3.5)$$

$$k_{\text{рв}} = \frac{1}{k_{\text{ш}} \cdot k_{\text{рзп}} \cdot 4 \cdot T_{\text{мв}}} = \frac{1}{0,0019 \cdot 1,56 \cdot 4 \cdot 0,33} = 255,6 -$$

де

коефіцієнт підсилення регулятора ваги.

Таким чином, при налаштуванні контуру ваги на модульний оптимум отримуємо регулятор ваги пропорційного типу з коефіцієнтом передачі  $k_{\text{рв}}$ .

### 3.4 Алгоритм формування завдання електроприводу в системі дозування сипких матеріалів

Необхідну точність в системах дозування отримують за рахунок організації замкнутого контуру регулювання по вазі. Максимальна швидкодія тут досягається за рахунок того, що регулятор ваги більшу частину часу дозування знаходиться в насиченні. З огляду на те, що дозуємі компоненти мають нестационарні властивості, що суттєво впливають на сипкість матеріалу, повторно отримати дозування матеріалу з заданою точністю стає проблематично. Класичний підхід підпорядкованого регулювання на практиці в таких системах дає сплеск помилок, що в підсумку при масовому виробництві виливається в значні фінансові втрати. Для зменшення помилки управління в контур регулювання ваги включається алгоритм корекції помилки дозування на основі статистичних даних з урахуванням підтримки продуктивності шнекового дозатора на оптимальному рівні [23, 24].

Розрахунок завдання на швидкість шнекового дозатора в реальному часі при корекції регулятора ваги і мінімальній швидкості завдання працює в

процесі дозування поточної порції матеріалу і мінімізує вплив зміни властивостей матеріалу.

Поточна помилка дозування визначається як

$$\Delta m_{ij} = m_{zi} - m_{ij}, \quad (3.6)$$

де  $i$  - поточний цикл дозування;  $j$  - цикл розрахунку в реальному часі з кроком розрахунку 333 мс;  $m_{zi}$  - завдання на дозування для поточного циклу;  $m_{ij}$  - поточна маса дозуемого матеріалу.

Завдання на швидкість двигуна визначається по формулі

$$f_{zj} = k_{pvi} \cdot \Delta m_{ij}. \quad (3.7)$$

При обмеженнях на частоту

$$f_{zj} = f_{z\max}, \text{ якщо } f_{zj} > f_{z\max}, \text{ и } f_{zj} = f_{z\min}, \text{ якщо } f_{zj} < f_{z\min,j-1},$$

де  $k_{pvj}$  - коефіцієнт регулятора ваги для кожного кроку розрахунку;  $f_{z\max}$  і  $f_{z\min}$  - розрахункові обмеження на частоту шнекового дозатора.

Для підвищення продуктивності і зменшення часу роботи на мінімальній швидкості включається таймер часу роботи режиму «плавного регулювання швидкості».

При перевищенні часу роботи збільшуються мінімальна швидкість і коефіцієнт регулятора ваги.

$$f_{z\min,j} = f_{z\min,j-1} + \Delta f_{z\min 1}; \quad (3.8)$$

$$k_{pvj} = k_{pv,i-1} + \Delta k_{pv 1}. \quad (3.9)$$

Якщо йде тривала робота на мінімальній швидкості, включається таймер контролю мінімальної швидкості і суттєво збільшується мінімальна швидкість роботи шнекового дозатора:

$$f_{z\min,j} = f_{z\min,j-1} + \Delta f_{z\min 2}; \quad (3.10)$$

$$\Delta f_{z\min 2} > \Delta f_{z\min 1}.$$

Дозування наступного циклу супроводжується алгоритмом корекції завдання на вагу з урахуванням попереднього дозування.

Вихідним параметром є помилка дозування по вазі попереднього дозування.

$$\Delta m_{i-1} = m_{zi-1} - m_{i-1} \quad (3.11)$$

де  $m_{zi-1}$  - задана маса;  $m_{i-1}$  - відпрацьована маса.

Коригувальна добавка до завдання визначається за формулою

$$m_{\text{доп}i} = m_{\text{доп}i-1} \pm \frac{\Delta m_{i-1}}{K_1}, \quad (3.12)$$

де  $K_1 \approx 2$  - підбирається експериментально [31].

Розрахунок завдання з корекцією визначається як

$$m_{zi} = m_{zi} - m_{\text{доп}i}. \quad (3.13)$$

Розроблений алгоритм був реалізований на мові СІ за допомогою механізму S-Function Builder в Simulink MatLab. Імітаційна модель системи управління з алгоритмом корекції помилки на основі статистичних даних зображена на рис. 3.8.

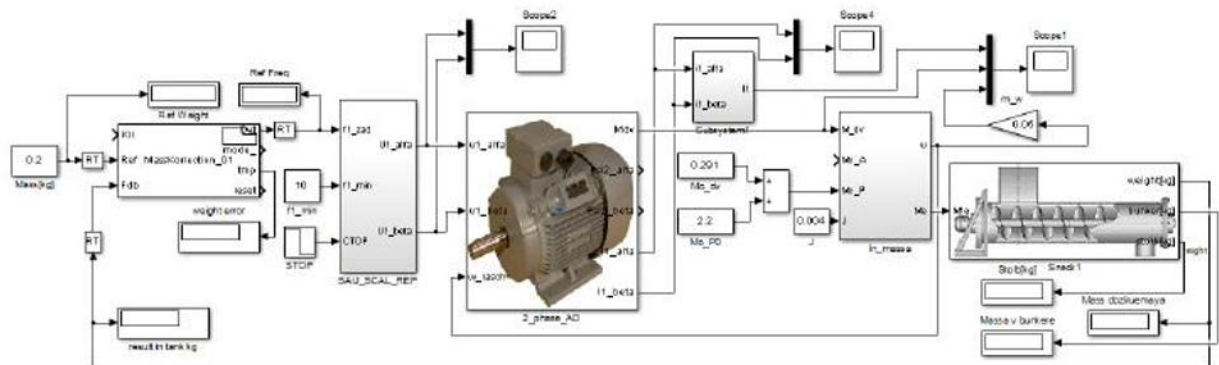


Рисунок. 3.8 – Модель системи управління з алгоритмом компенсації помилки дозування

На рис. 3.9 зображений графік перехідного процесу дозування одного кілограма матеріалу без алгоритму корекції завдання на основі статистичних даних.

При пуску без використання алгоритму корекції спостерігаємо абсолютну помилку дозування 0,191 кг або відносну помилку - 19,1% дозуемого матеріалу.

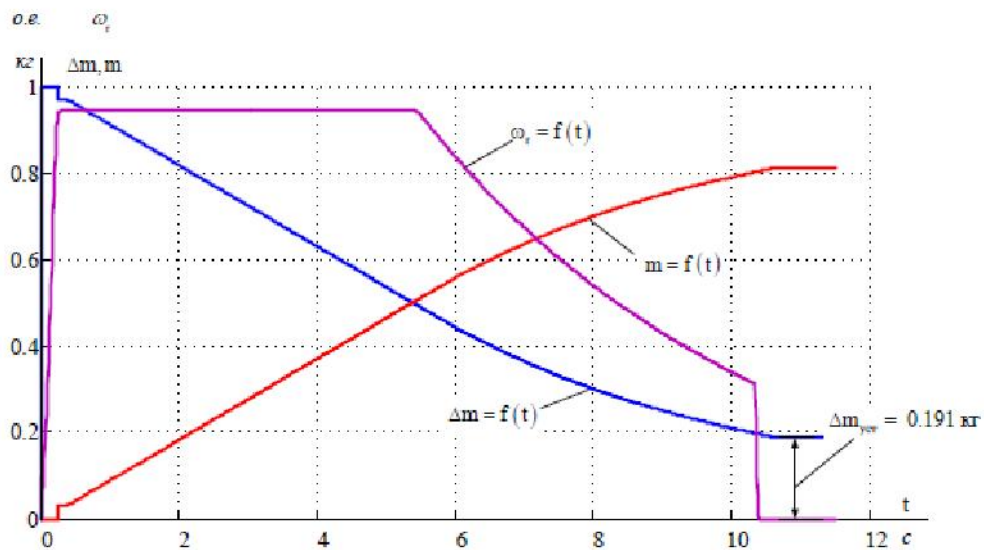


Рисунок 3.9 – Перехідні процеси при першому пуску дозування (без корекції завдання на основі статистичних даних)

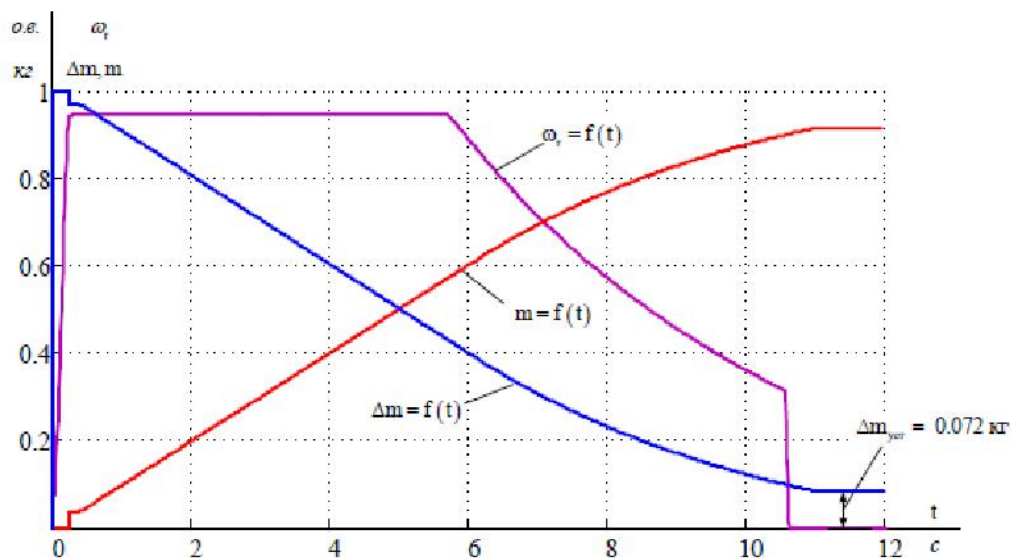


Рисунок 3.10 – Перехідний процес при наступних циклах дозування

З рис. 3.10 видно, що відбулася компенсація абсолютної помилки дозування в 2,65 раз при застосуванні алгоритму корекції завдання на основі статистичних даних. Отримана помилка дозування дорівнює 0,072 кг або 7,2%

від маси дозованого матеріалу, що в 2,4 рази більше, ніж необхідна за регламентом приготування кормосуміші.

Для подальшого зменшення помилки дозування до 3% необхідно застосувати алгоритм компенсації помилки від маси падаючого стовпа матеріалу.

### **3.5 Алгоритм корекції помилки, викликаной масою «падаючого стовпа» матеріалу**

При дозуванні сипучих вантажів тензодатчики фіксують вагу матеріалу, який знаходиться фактично в бункері. Якщо не враховувати вагу падаючого стовпа матеріалу, що знаходиться в повітрі після зупинки шнека, можна отримати значну підсумкову помилку дозування. У деяких системах дозування маса падаючого стовпа може досягати декількох десятків кілограмів. Компенсувати масу падаючого стовпа необхідно при формуванні завдання системі управління. Маса, що не вимірюється датчиками ваги, вже знаходиться всередині бункера в стані падіння. Для її обліку необхідно до сигналу зворотного зв'язку додати величину обчисленої маси падаючого стовпа. У систему управління надходить виміряна величина маси дозованого матеріалу в бункері [33]. Якщо відома насипна вага дозуемого матеріалу  $\gamma$  і бункер виконаний у вигляді паралелепіпеда, то масу падаючого стовпа можна розрахувати за формулою (2.44).

Геометричні розміри бункера і щільність матеріалу задаються в алгоритмі управління як постійні величини і для контролю маси падаючого стовпа необхідна інформація з датчиків ваги. Підставивши в формулу (2.44) значення площі падаючого стовпа з формули (2.43) і висоти падаючого стовпа, що розраховується за формулою (2.42) і виконуючи перетворення з урахуванням формул (2.40) і (2.41), отримуємо вираз для визначення маси падаючого стовпа :

$$m_{cr} = \left[ \frac{\pi}{4} \cdot (D_0^2 - d_0^2) \right] \cdot \left[ h_0 + \left( h_0 - \frac{m}{\rho \cdot a \cdot b} \right) \right] \cdot \gamma. \quad (3.14)$$

Для бункера, виконаного у вигляді усіченої піраміди з паралелепіпедом в основі (див. рис. 2.9), маса падаючого стовпа визначається за виразом:

$$m_{cr} = \left[ \frac{\pi}{4} \cdot (D_0^2 - d_0^2) \right] \cdot \left[ h_0 + \left( h_0 - \frac{m \cdot 3}{\rho \cdot c \cdot (d \cdot e + \sqrt{d \cdot e \cdot a \cdot b} + a \cdot b)} \right) \right] \cdot \gamma. \quad (3.15)$$

Далі обчислюємо помилку дозування, з урахуванням коригування маси «падаючого стовпа» матеріалу, яка надходить на вхід регулятора ваги в алгоритмі управління:

$$\Delta m = m_{зад} - (m_{oc} + m_{cr}), \quad (3.16)$$

де  $m_{зад}$  - задана маса матеріалу;  $m_{oc}$  - маса, отримана за сигналом зворотного зв'язку.

Для імітаційного моделювання за формулами, наведеними вище, будемо структурну схему (рис. 3.11).

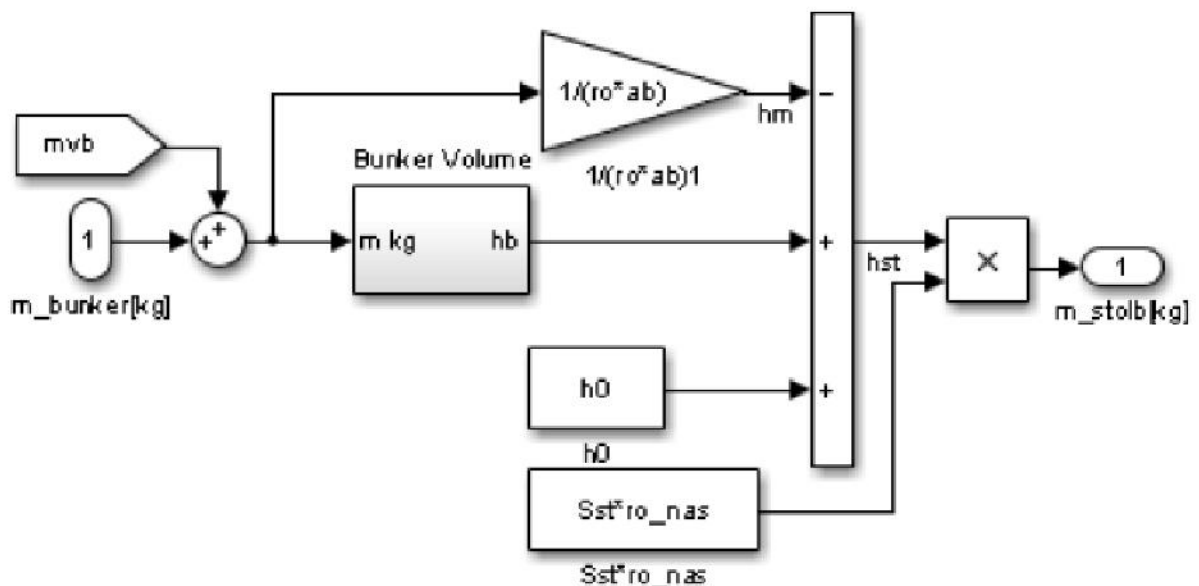


Рисунок 3.11. Імітаційна модель алгоритму обчислення маси падаючого стовпа матеріалу

Підвищення точності системи дозування сипких матеріалів можна досягти шляхом використання спільного застосування розглянутих вище алгоритмів корекції помилок дозування.

Імітаційна модель комплексного застосування алгоритму врахування впливу маси падаючого стовпа в бункер дозатора і алгоритму корекції помилки на основі статистичних даних представлена на рис. 3.12.

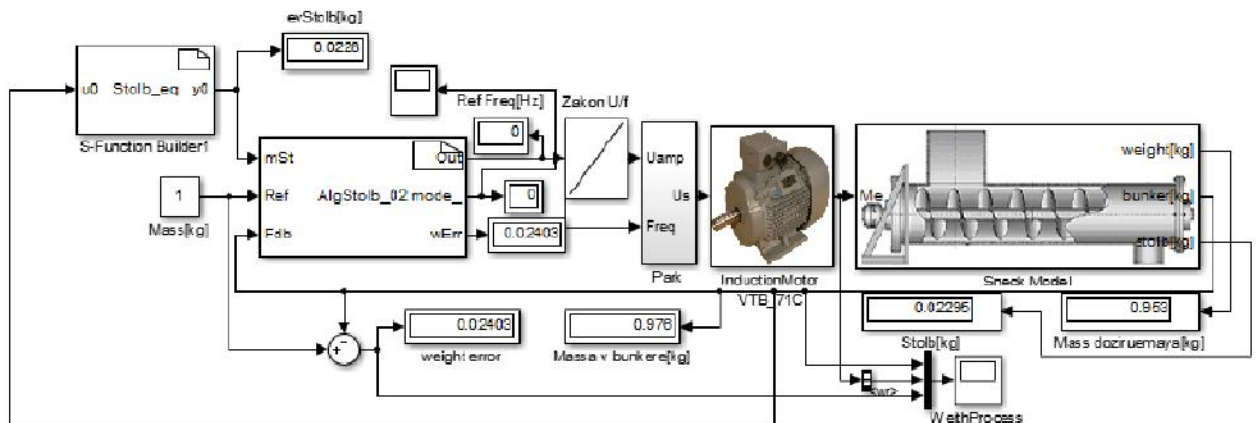


Рисунок. 3.12. Комплексна імітаційна модель корекції помилки

Результати імітаційного моделювання дозування 1 кілограма сипучого матеріалу при спільному використанні алгоритмів компенсації помилки наведені на рис. 3.13. Як видно з рис. 3.13, застосування алгоритмів компенсації помилки дозування дозволяє зменшити абсолютну помилку дозування в 7,07 раз, щодо дозування на імітаційній моделі з релейним регулятором ваги без використання алгоритмів корекції помилок (рис.2.17) і результуюча помилка дозування склала 2,7%, що відповідає вимогам технічного регламенту приготування комбікорму ( $\pm 3\%$ ).

На імітаційній моделі була проведена серія експериментів при дозуванні матеріалу різної ваги при спільному використанні алгоритмів корекції завдання на основі статистичних даних та компенсації помилки дозування, викликаной масою падаючого стовпа матеріалу. Результати моделювання дозування 2 і 3 кілограмів матеріалу при використанні алгоритмів корекції помилки зображені на рис. 3.13 і 3.15.

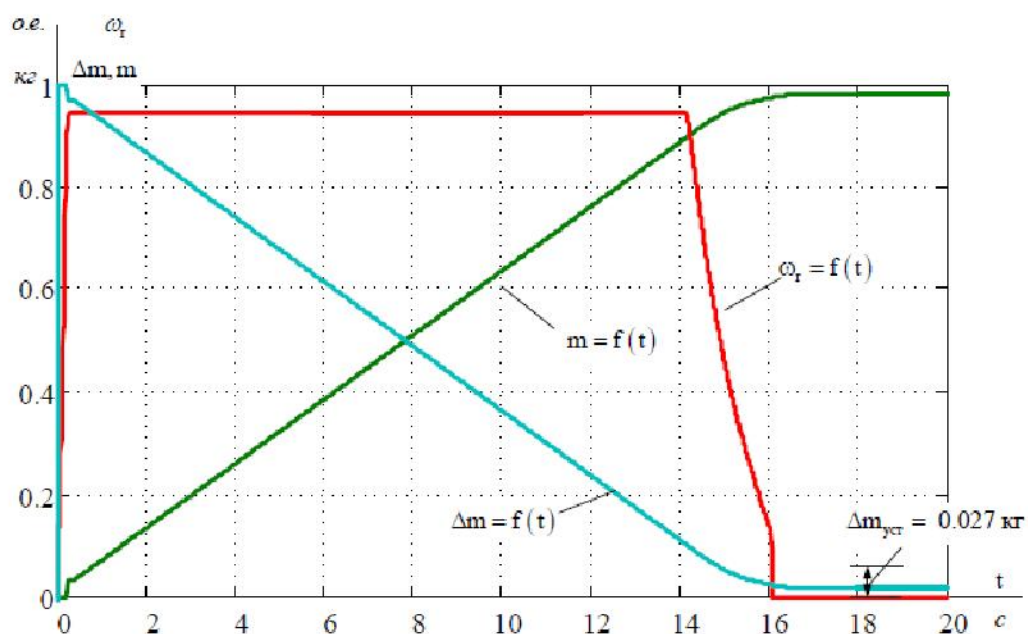


Рисунок. 3.13. Дозування при спільному використанні алгоритмів корекції помилок

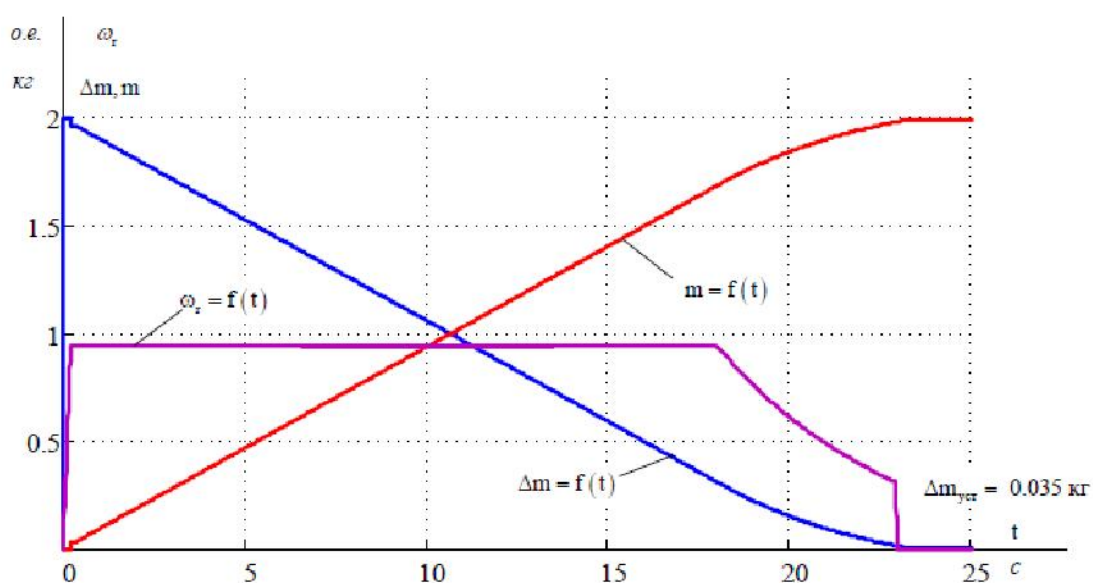


Рисунок. 3.14. Результати моделювання дозування 2 кілограмів матеріалу при використанні алгоритмів корекції помилок

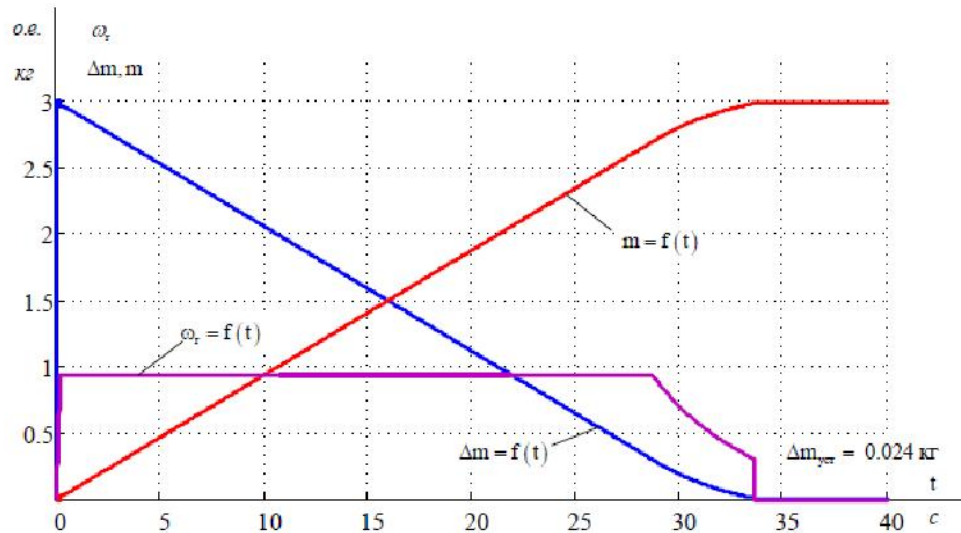


Рисунок. 3.15. Результати моделювання дозування 3 кілограмів матеріалу при використанні алгоритмів корекції помилок

Гістограма, що показує значення помилки при декількох циклах дозування різного завдання ваги, зображена на рис. 3.16.

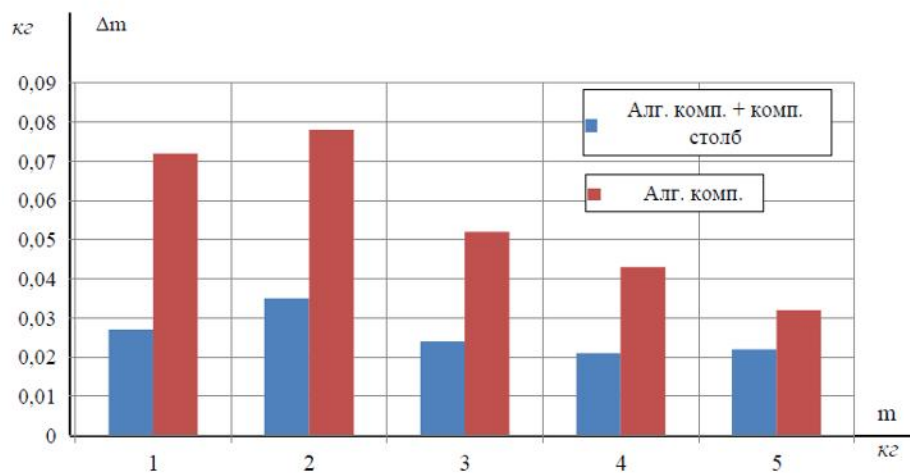


Рисунок 3.16 – Гістограма помилки при використанні алгоритмів сигнальної адаптації

Червоним кольором показані результати роботи алгоритму корекції помилки по статистичним даним, а синім кольором показані результати роботи алгоритму корекції помилки по статистичним даним і при використанні алгоритму компенсації помилки, що викликана масою падаючого стовпа матеріалу. Як видно з рис.3.16, при першому циклі

дозування абсолютна помилка максимальна, а в наступних циклах дотримується тенденція її зменшення. Це можна пояснити тим, що алгоритм компенсації помилки використовує результати попереднього дозування для корекції поточного. Розроблені алгоритми засновані на використанні статистичних даних по кожному дозованому компоненту окремо.

### **3.6 Методика проектування систем багатокомпонентного дозування**

При проектуванні систем багатокомпонентного дозування необхідно враховувати всі статичні і динамічні фактори, які можуть впливати на продуктивність системи і якість приготування кінцевого продукту. Для створення подібних систем необхідно дотримуватися такої методики.

1. Оцінка кількості компонентів, фракційного складу дозується матеріалу і визначення діапазону зміни їх властивостей.

Комбікорми представляють собою складну однорідну суміш різних кормових компонентів, попередньо очищених, подрібнених і підібраних за науково обґрунтованими рецептами з метою найбільш ефективного використання тваринами поживних речовин.

Основою комбікормів є зернова сировина, вона становить приблизно 60-65% у всіх використовуваних рецептах комбікормів. Із зернових культур це: пшениця, ячмінь, кукурудза, овес, просо. Їх особливість - високий вміст вуглеводів до 70%, низький вміст білка - 10-15% [56]. Бобові - горох, боби, соя, люпин. Це високобілкові культури з вмістом білка 25-45%. Олійні культури: соняшник, бавовник, рапс, вносяться в комбікорми у вигляді відходів від виробництва рослинного масла (макуха, шрот). Також до складу можуть входити відходи, одержувані при переробці зерна в крупу та борошно, відходи харчової промисловості, корми тваринного походження, грубі корми та ін.

Технологія приготування комбікормів складається з наступних послідовно виконуваних операцій: приймання, розміщення і зберігання сировини; подрібнення; дозування; змішування пресування; зберігання.

Комбікорми та білково-вітамінні добавки виробляють тільки за затвердженими рецептами, складеним з урахуванням допустимих норм включаються технологічно підготовлених складових частин комбікорму (компонентів комбікорму) в залежності від виду, віку і призначення тварини або птиці.

Рівнозначні компоненти замінюють в співвідношенні 1:1 для раціонального використання різних видів сировини, наявних на даному комбікормовому заводі. Рівнозначними компонентами є для злакових культур: зерно кукурудзи, ячмінь, жито, пшениця, овес, просо; для бобових культур - горох, соя, сочевиця, кормові боби, люпин безалкалоїдний; зерно-злакових і бобових культур: однойменні січки, що одержуються в круп'яному виробництві. При внесенні змін до складу рецепта обов'язково розраховують його поживність.

Процес дозування кожного компонента залежить від гранулометричного складу матеріалу. За гранулометричним складом сипучих матеріалів оцінюють кількісний розподіл складових його частинок за лінійними розмірами.

Для визначення гранулометричного складу сипучих матеріалів використовують методи безпосереднього вимірювання, ситового аналізу, седиментаційного аналізу, фільтрації, розділення в полі відцентрових сил і електрокласифікації [5].

Вологість сипучих матеріалів впливає на безліч їх властивостей: сипкість, коефіцієнти внутрішнього і зовнішнього тертя, насипна об'ємна маса і т.ін.

Гігроскопічність зернової маси означає її здатність поглинати пари води з повітря або виділяти її в навколишнє середовище. Білкові молекули зерна здатні вбирати до 240%, а дрібнодисперсні матеріали,

такі як крохмаль - до 30-38% води щодо своєї маси. Гігроскопічність зерна залежить як від його властивостей, так і від властивостей повітря.

В результаті взаємодії зернової маси з навколишнім середовищем вологість зерна безперервно змінюється до досягнення рівноважної вологості. Сама рівноважна вологість зерна встановлюється при насиченні повітря водяною парою до 100%. Подальше зволоження може відбуватися тільки при усмоктуванні крапельно-рідкої вологи. Вологість зерна 7-10% встановлюється при відносній вологості повітря 15-20%. Це найнижча межа вологості зерна в виробничих умовах.

Зерно і насіння зернових, олійних та бобових культур через різний хімічний склад мають неоднакову рівноважну вологість. Найвища вона у насіння бобових, середня - у зернових, і найменша - у олійних культур. Зниження величини рівноважної вологості обумовлено зменшенням вмісту в зерні гідрофільних речовин. Зі зниженням температури повітря рівноважна вологість зерна і насіння зростає.

## 2. Визначення незмінних параметрів системи багатокомпонентного дозування.

До незмінних параметрів системи відносяться: геометричні розміри бункера дозатора і шнека; розташування шнекового дозатора щодо бункера в вертикальній і горизонтальній площині.

Для динамічного визначення маси «падаючого стовпа» матеріалу при дозуванні в алгоритм вводяться постійні величини: геометричні розміри бункера (висота, ширина, довжина), відстань від бункера до шнека, а також паспортні дані шнекового дозатора (діаметр зовнішній і внутрішній, крок гвинта).

Продуктивність і точність дозування безпосередньо залежить від кута нахилу шнекового дозатора. Коефіцієнт, що враховує кут нахилу шнекового дозатора необхідно визначити і внести як вихідні дані в програмне забезпечення автоматизованої системи дозування.

По результатах досліджень можна зробити висновок, що найбільш оптимальні показники дозування можна отримати при горизонтальному розташуванні шнека до лінії горизонту. Виходячи з цього факту, необхідно або добитися відповідного розташування технологічного обладнання, або точно визначити кут нахилу і враховувати цю інформацію в алгоритмі управління.

3. Налаштування математичної і імітаційної моделі з урахуванням параметрів компонентів і технологічного устаткування

За допомогою імітаційного моделювання здійснюється попередня перевірка точності процесу дозування для різних компонентів кормосуміші з побудовою кількісних залежностей з урахуванням параметрів електротехнічного комплексу і властивостей дозованих компонентів.

4. Вибір структури і параметрів регулятора ваги

З отриманих залежностей вибирається структура і параметри регулятора ваги. Процес дозування сипучих матеріалів не повинен супроводжуватися перерегулюванням і тому контур ваги налаштовується на модульний оптимум з регулятором ваги пропорційного типу.

5. Коригування процесу дозування за допомогою розроблених алгоритмів корекції завдання ваги

Підвищення ефективності управління електроприводу автоматизованого комплексу дозування сипких матеріалів проводиться за допомогою застосування розроблених сигнальних алгоритмів на основі статистичних даних і алгоритму корекції помилки дозування, зумовленої неврахованій датчиками ваги маси «падаючого стовпа» матеріалу в бункер-дозатор.

### **Висновки по 3 розділу**

1. Розроблено алгоритм управління частотно-регульованим асинхронним електроприводом, що дозволяє дозувати із заданою точністю малі компоненти кормосуміші. Виявлено, що для зменшення впливу маси «падаючого стовпа» на точність дозування, необхідно встановити порядок дозування компонентів усередині рецепту від найбільшого компонента до найменшого компонента.
2. Встановлено, що для зменшення помилки дозування в контур регулювання ваги необхідно ввести алгоритм корекції помилки на основі статистичних даних. Виявлено, що застосування алгоритму корекції помилки дозування на основі статистичних даних дозволяє зменшити абсолютну помилку у 2,6 рази.
3. Виявлено, що для виключення змінної помилки дозування, що виникає через масу падаючого стовпа матеріалу всередину бункера-дозатора, системі управління частотно регульованого електроприводу необхідно використовувати алгоритм динамічної корекції завдання на дозування з урахуванням компенсації впливу маси падаючого стовпа в реальному часі.

## ВИСНОВКИ

За результатами проведених у магістерській роботі теоретичних досліджень сформульовано такі результати:

1. Запропоновано структуру та алгоритмічне забезпечення автоматизованого комплексу вагового багатокomпонентного дозування сипких матеріалів з частотно-регульованим електроприводом, що забезпечують високу продуктивність та необхідну точність дозування.

2. Розроблено математичну та імітаційну моделі частотно регульованого електроприводу у складі автоматизованого комплексу дозування сипких матеріалів з урахуванням зміни висоти «падаючого стовпа» в бункер дозатора.

3. Розроблено алгоритм сигнальної адаптації на основі статистичних даних для керування електроприводом автоматизованого комплексу дозування сипких матеріалів, який дозволив зменшити абсолютну помилку дозування приблизно в 2,5 рази.

4. Розроблено алгоритм управління частотно-регульованим асинхронним електроприводом, що дозволяє дозувати із заданою точністю малі компоненти кормосуміші.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Банга В.І. Обґрунтування та оптимізація параметрів мобільного роздавача-дозатора концентрованих кормів для індивідуальної нормованої годівлі корів./ В.І.Банга // Глеваха.: ННЦ "ІМЕСГ", 2006. – 20 с.
2. Lyn Bates. Guide to the design, selection, and application of screw feeders. – Wiley, 2008. – 168 p.
3. Козупиця С.І. Математичне обґрунтування процесу змішування при одночасному подрібненні в технології хімічного консервування зерностержнкової суміші кукурудзи/ С.І. Козупиця // Вісник ЛДАУ. – Вип.3, Львів: ЛДАУ, 2009. – С. 159 – 162.
4. Лінник М.К. Змішування зерностержнкової маси кукурудзи із сипким хімічним компонентом при одночасному їх подрібненні/ М.К.Лінник, С.І.Козупиця // Вісник СНАУ. – Вип. 13. – Суми: СНАУ, 2011. – С. 5 – 12.
5. Бернік П. С. Механічні процеси і обладнання переробного та харчового виробництва. / П.С. Бернік, З.А. Стоцько, І.П. Паламарчук та ін. Львів "Львівська політехніка", 2004. – 336с.
6. Біла Т. Я. Математичне моделювання електромеханічних систем: навчальний посібник / Т. Я. Біла, В. В. Стаценко – Київ: КНУТД, 2016. – 400 с.
7. Біла Т. Я. Обробка інформації в інтерактивних середовищах : навчальний посібник / Т. Я. Біла, В. В. Стаценко – Київ: КНУТД, 2017. - 396 с.
8. Бурмістенков О. П. Електромеханічні пристрої (теорія і практика) / О.П. Бурмістенков, І. В Петко., М. Й. Бондаренко, Б. М.Злотенко. - Київ: КНУТД, 2017. – 260 с.
9. Гевко І. Б. Гвинтові транспортно-технологічні механізми: розрахунок і конструювання / І. Б. Гевко - Тернопіль : ТДТУ, 2008. - 107 с.

- 10.Електропривод: Підручник / Ю. М. Лавріненко, О. С. Марченко, П. І. Савченко та інш.; за ред. Ю. М. Лавріненка. - К.: Ліра-К, 2009. - 504 с.
- 11.Загірняк М.В. Електричні машини: підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – К.: Знання, 2009. – 399 с.
- 12.Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум: Навч. посіб. /За ред.. А. Г.Соскова. 2-е вид. –К.: Каравела, 2004. – 432 с.
- 13.Мирончук В. Г. Розрахунок обладнання підприємств переробної і харчової промисловості. / В. Г. Мирончук, Л. О. Орлов, Л. О. Пушанко та ін. - Вінниця.: Нова книга. 2004. – 288 с.
- 14.Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Мацько Б. М. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. посіб./ Під ред. М. Г. Поповича – К.: Либідь, 2013. – 680 с.
- 15.Процеси та обладнання підготовчих виробництв легкої промисловості: навч. посіб. / Бурмістенков О. П. та ін. - Київ: КНУТД, 2011. - 135 с.
- 16.Розробка та дослідження електромеханічних систем та складових електроприводів. Навчальний посібник./ Попович М. Г., Кострицький В.В., Артеменко, Л. Ф., Бурмістенков О. П. та ін. – К.: КНУТД, 2011. – 492 с.
- 17.Стаценко В. В. Автоматизовані комплекси безперервного приготування композицій сипких матеріалів : монографія / В. В.Стаценко, О. П. Бурмістенков, Т. Я. Біла – Київ : КНУТД, 2017. – 220 с.
- 18.Схемотехніка електронних систем: У 3 кн. Кн. 1. Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої: Підручник /В. І. Бойко, А. М. Гуржій, В. Я. Жуйков та ін. – 2-ге вид., допов. і переробл. – К.: Вища шк., 2004. – 366 с.
- 19.Шнекові дозатори – вільний доступ: <https://elo-pack.net/-dozatory-ukr-.html>

20. Aliev E.B., Bandura V.M., Pryshliak V.M., Yaropud V. M., Trukhanska O.O.. Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. INMATEH - Agricultural Engineering. 2018. Vol. 54, 1. P. 95–104.
21. Andersson J., Krus P., Wallace D. Multi-objective optimization of hydraulic actuation systems // Proceedings of the 2017 ASME Design Automation Conference (DETC'17).
22. Chen L. Q. Analysis and control of transverse vibrations of axially moving strings / L. Q. Chen // Appl. Mech. Rev. 2005.– Volume 58.2. – P. 91– 116.
23. Chen L. Q. Transverse vibrations of an axially accelerating viscoelastic string with geometric nonlinearity/ Chen, L. Q., Zu, J. W., Wu, J. // Journal of Engineering Mathematics 48, 2004.-p. 171–182.
24. Chudak R.A., Poberezhets Y.M., Vozniuk O.I., Dobronetska V.O. Echinacea pallida extract effect on quils meat quality. Ukrainian journal of ecology. 2019. Vol. 9, 2. P. 151-155.
25. Extrusion-Cooking Techniques: Applications, Theory and Sustainability: [edited by Leszek Moscicki]. – Weinheim: WILEY-VCH, 2011. – 234 p.
26. Fellows P.J. Food Processing Technology.Principles and Practice /P.J. Fellows.– Cambridge: CR'C, Woodhead Publishing, 2002 – 575 p.
27. Klemens, K. Co-Rotating Twin Screw Extruders / Klemens Kohlgruber, James Lindsay White, Helmut Potente, U. Berghaus. - Hanser Gardner, 2007. - P. 362.
28. Kobets A. S., Naumenko M. M., Ponomarenko N. O., Kharytonov M. M., Velychko O. P., Yaropud V. M. Design substantiation of the three-tier centrifugal type mineral fertilizers spreader. INMATEH – Agricultural Engineering. 2017. Vol. 53, 3. P. 13–20.
29. Miller R. Unit operations and equipment /R. Miller // Breakfast Cereals and How They Are Made. – American Association of Cereal Chemist. – St. Paul, MN. – 1990. – p. 145.
30. Rauwendaal, C. Polymer Extrusion 3rd ed/ C. Rauwendaal, H. Gardner/ - Publisher. - New York, 1994. - P. 568.

- 31.Братішко В.В. Науково-технічні основи приготування комбікормів гвинтовими грануляторами: монографія. Тернопіль: Видавництво «Крок». 2017. 234 с.
- 32.Войтюк Д. Г., Булгаков В. М., Кропивко С. В., Онищенко В. Б. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: підруч. Для студ. вузів. Київ : Друк, 2005. 464 с.
- 33.Гевко Б. М. Технологія сільськогосподарського машинобудування: навч. посіб / Б. М. Гевко, І. Б. Гевко, Д. Л. Радик. – К. : Кондор, 2006. – 496 с.
- 34.Гевко І. Б. Гвинтові транспортно-технологічні механізми: розрахунок і конструювання. Тернопіль: ТДТУ імені Івана Пулюя. 2008. 307 с.
- 35.Ковбаса В. П., Швайко В. М., Гуцол О. П. Механіка сільськогосподарських матеріалів та середовищ: навч. посібник. Ніжин: Видавець ПП Лисенко М. М., 2015. 536 с.
- 36.Ковбаса В. П., Ярошенко В. В. Розподіл напружень у сипкому середовищі обмеженому стінками споруди силосного типу. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2010. Вип. 40, 1. С. 314-324.
- 37.Кондратюк Д.Г., Дмитренко В.П., Волошиненко В.М. Математична модель динаміки: середовище – пружний шнек екструдера. Збірник наукових праць ВНАУ. Серія: Технічні науки. 2016. Вип. 1, 93. С. 43-47.
- 38.Малаков О.І., Бурлака С.А., Михальова Ю.О. Математичне моделювання та основи конструювання вібраційних змішувачів. Вісник Хмельницького національного університету. 2019. 5, 277. С. 30-33.
- 39.Turych V., Veselovska N., Rutkevych V., Shargorodsky S. Investigation of the process of thread extrusion using the ultrasound. Eastern-European Journal of Enterprise technologies. 2017. Vol. 6, 1. P. 60–68.

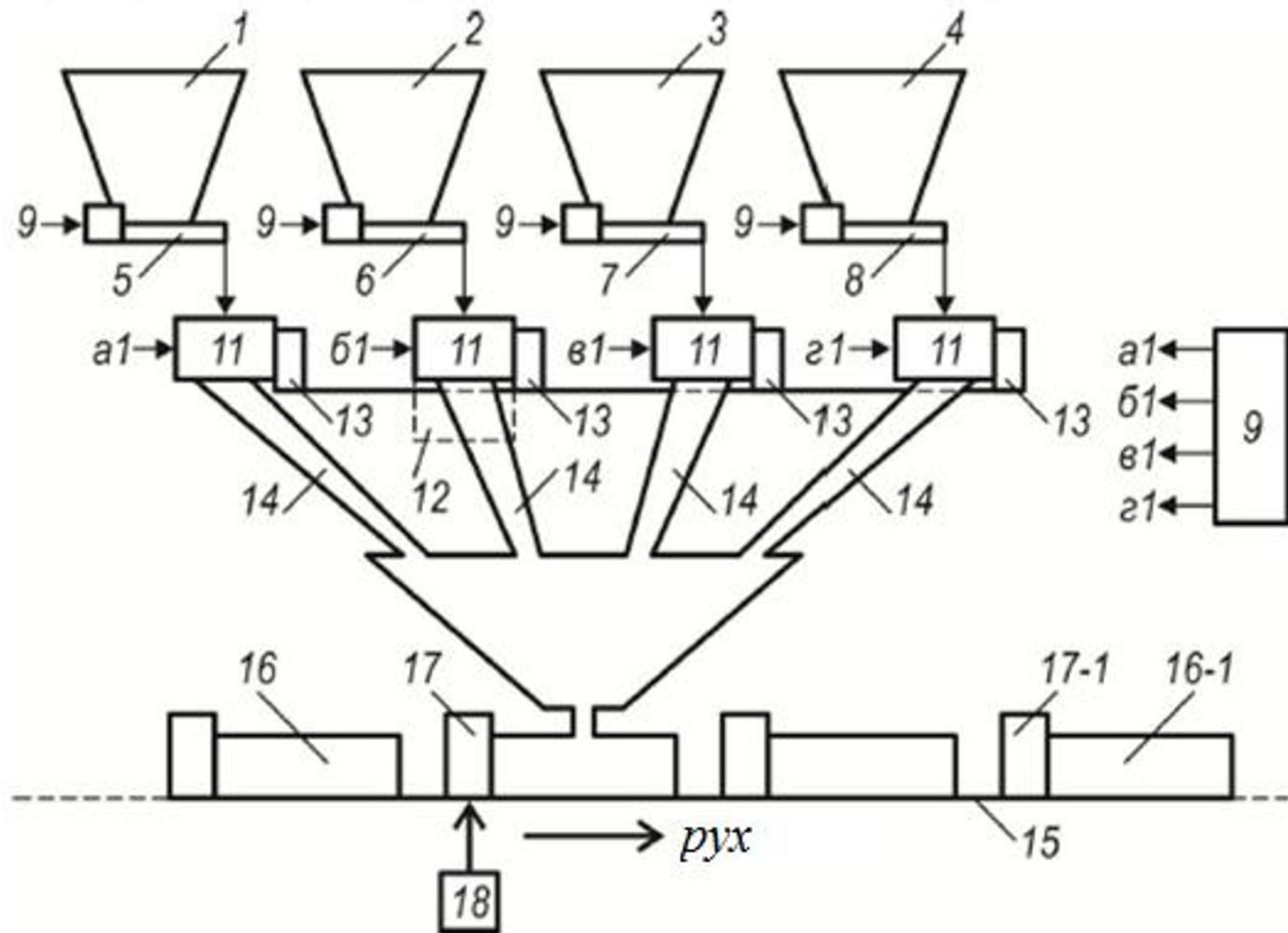
Мета роботи. Забезпечення заданих точності і продуктивності автоматизованого електротехнічного комплексу вагового дозування сипких матеріалів шляхом застосування ефективних алгоритмів управління частотно-регульованим асинхронним електроприводом шнекових дозаторів.

Для досягнення зазначеної мети вирішені наступні завдання:

- аналіз пристроїв дозування сипких матеріалів і способів управління частотно-регульованим електроприводом шнекового дозатора;
- побудова узагальненої математичної і імітаційної моделей електроприводу шнекового дозатора комплексу дозування сипких матеріалів;
- розроблення алгоритмів керування частотно-регульованим асинхронним електроприводом шнекового дозатора в умовах нестабільності параметрів сипучого матеріалу;
- імітаційне моделювання та експериментальні дослідження розроблених алгоритмів керування електроприводом шнекових дозаторів.

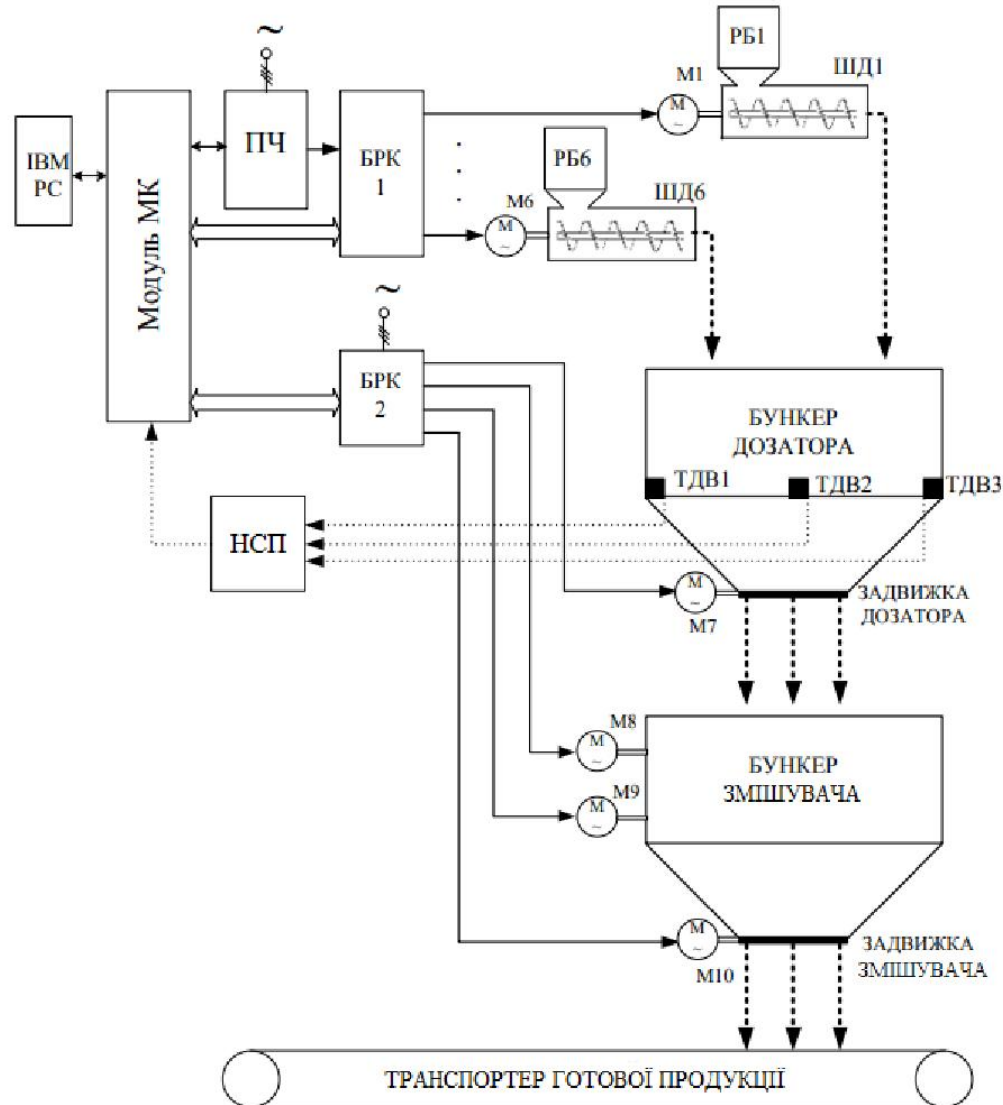
# Пристрій для приготування багатоконпонентних сумішей

2



# Функціональна схема асинхронного електроприводу шнекового дозатора для автоматичного дозування сипких матеріалів

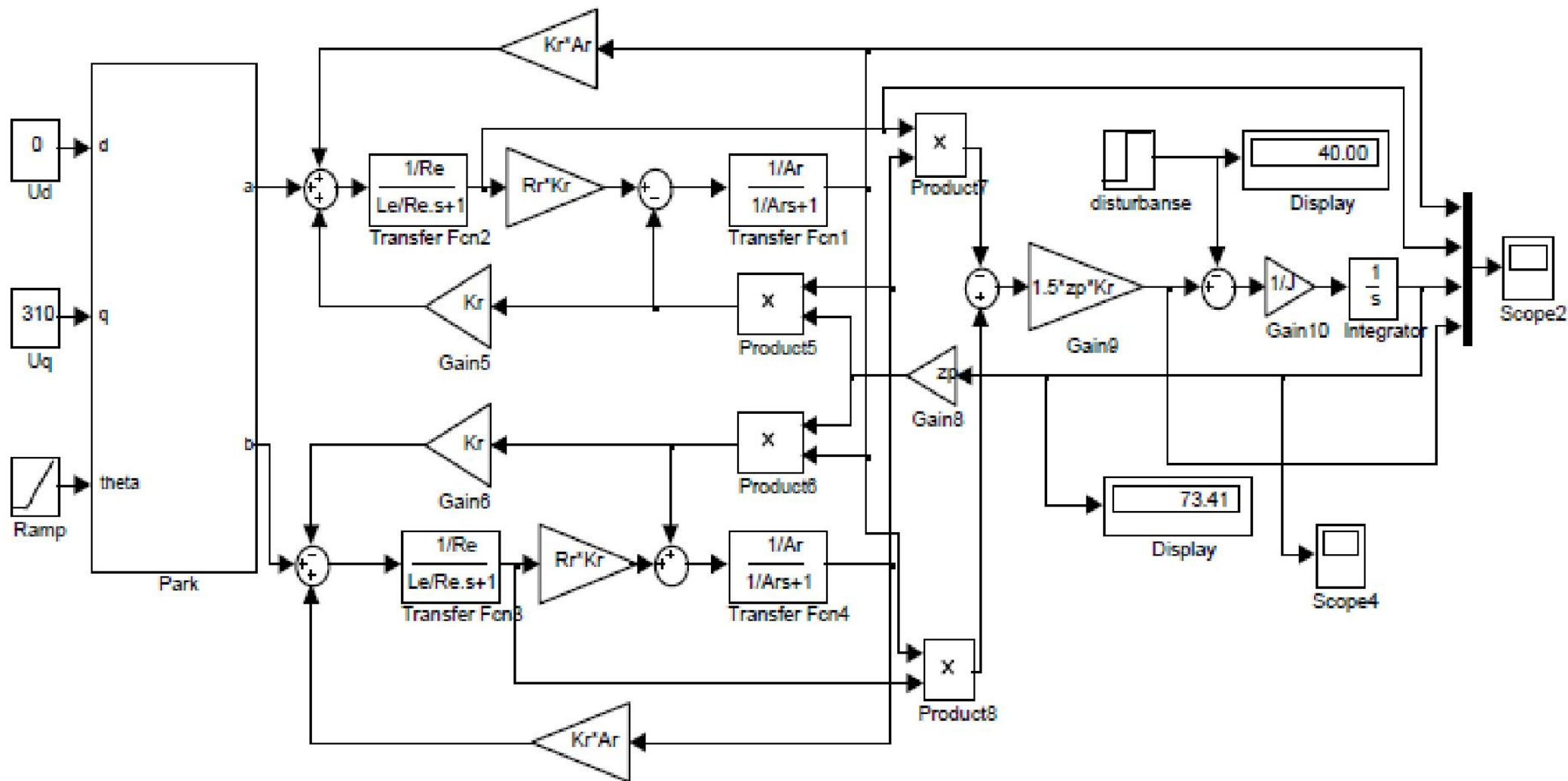
3



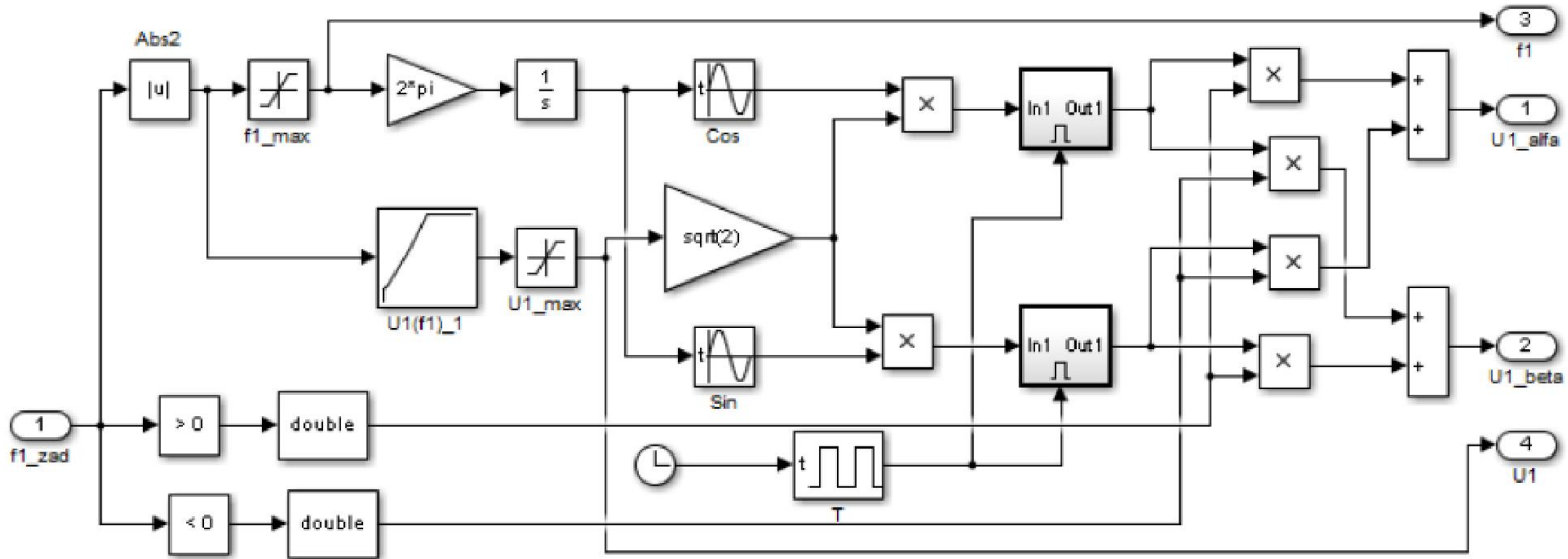
ПЧ – перетворювач частоти;  
БРК – блок релейної комутації;  
НСП – нормуючий і сумуючий підсилювач;  
РБ – розхідний бункер;  
ШД – шнековий дозатор;  
МК – мікроконтролер



# Структурна схема імітаційної моделі в нерухомій системі координат в додатку Simulink пакету MATLAB

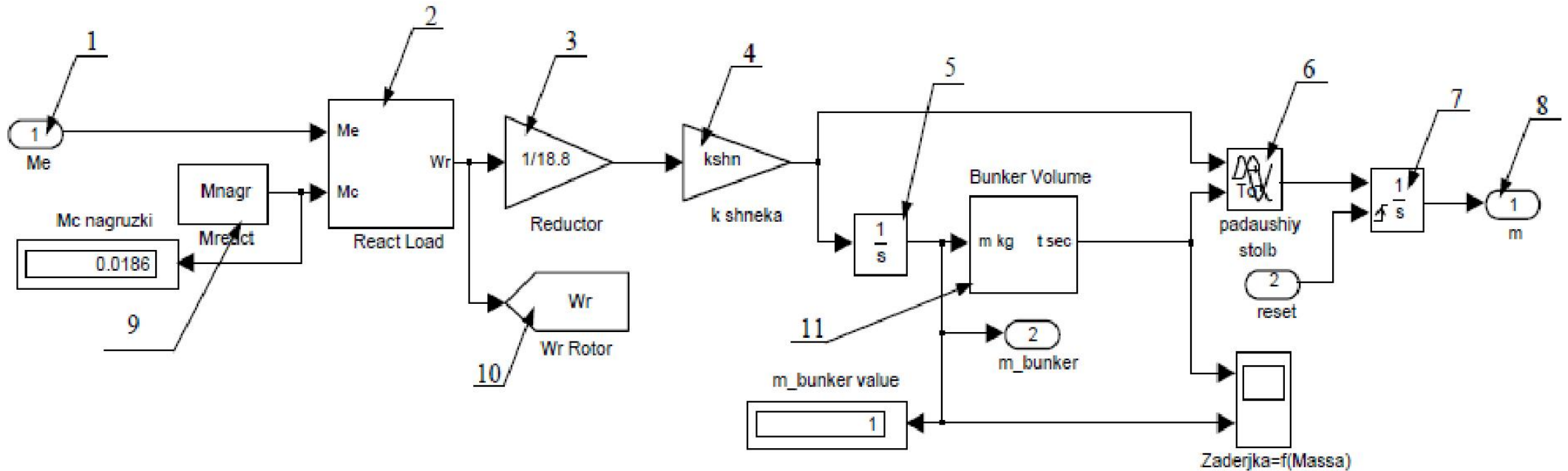


# Імітаційна модель перетворювача частоти зі скалярним керуванням



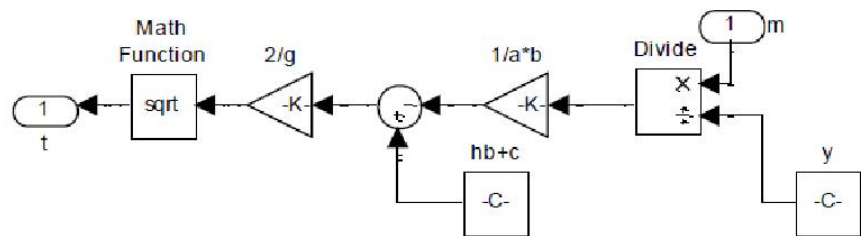
# Імітаційна модель механічної системи

7



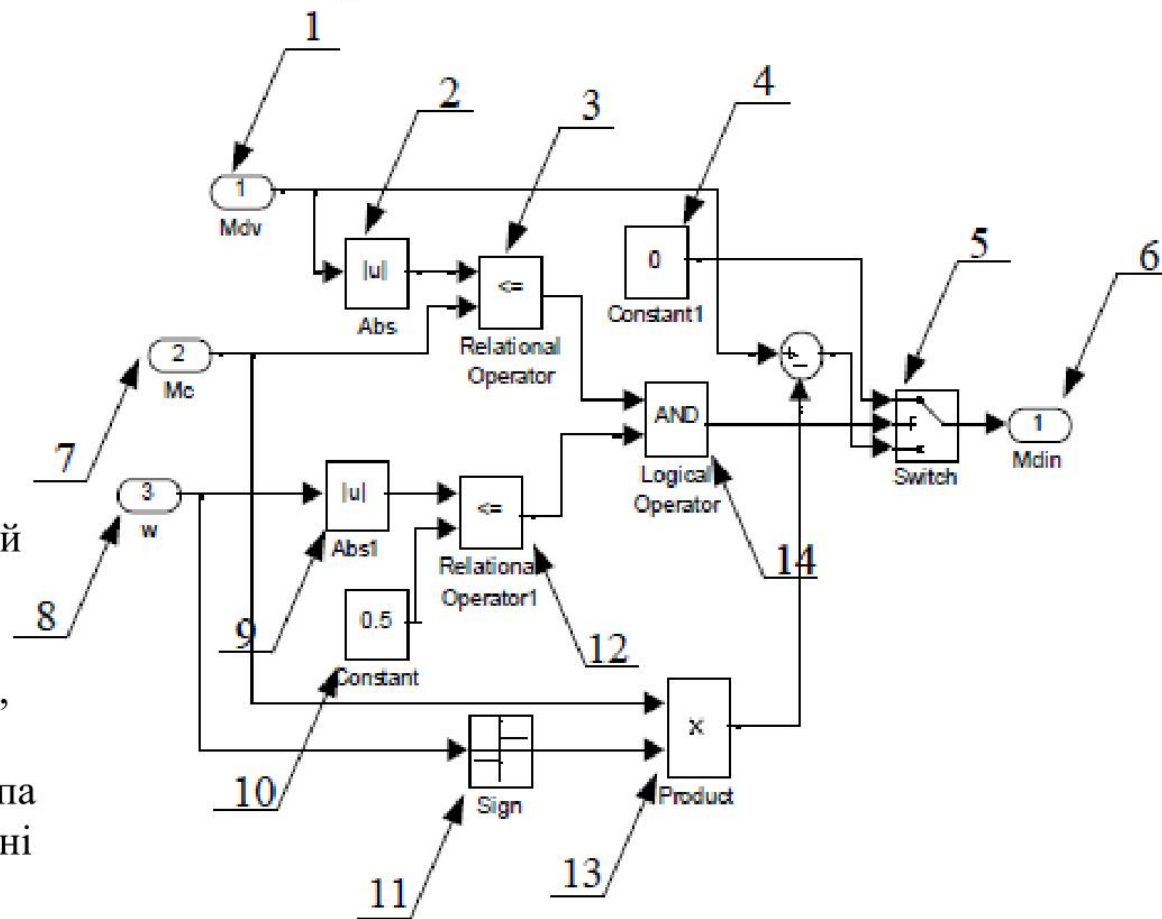
1 - вхідний сигнал в механічну підсистему, що представляє собою електромагнітний момент двигуна; 2 - блок, що враховує реактивний момент опору в механічній системі; 3 - блок, що враховує передавальне число редуктора; 4 - блок, що враховує коефіцієнт передачі шнекового дозатора; 5 - блок інтегратора, що характеризує накопичувальну масу матеріалу в бункері без тимчасової затримки; 6 - блок, що враховує затримку при падінні матеріалу; 7 - блок інтегратора, що характеризує накопичувальну масу матеріалу в бункері; 8 - вихід механічної підсистеми у вигляді маси, накопиченої в бункері-дозаторі при поточному процесі дозування; 9 - приведений момент опору на валу; 10 - вихід механічної підсистеми у вигляді швидкості двигуна; 11 - блок, що враховує залежність затримки часу падіння матеріалу від маси, накопиченої в бункері.

## Підсистема блоку 11 механічної системи

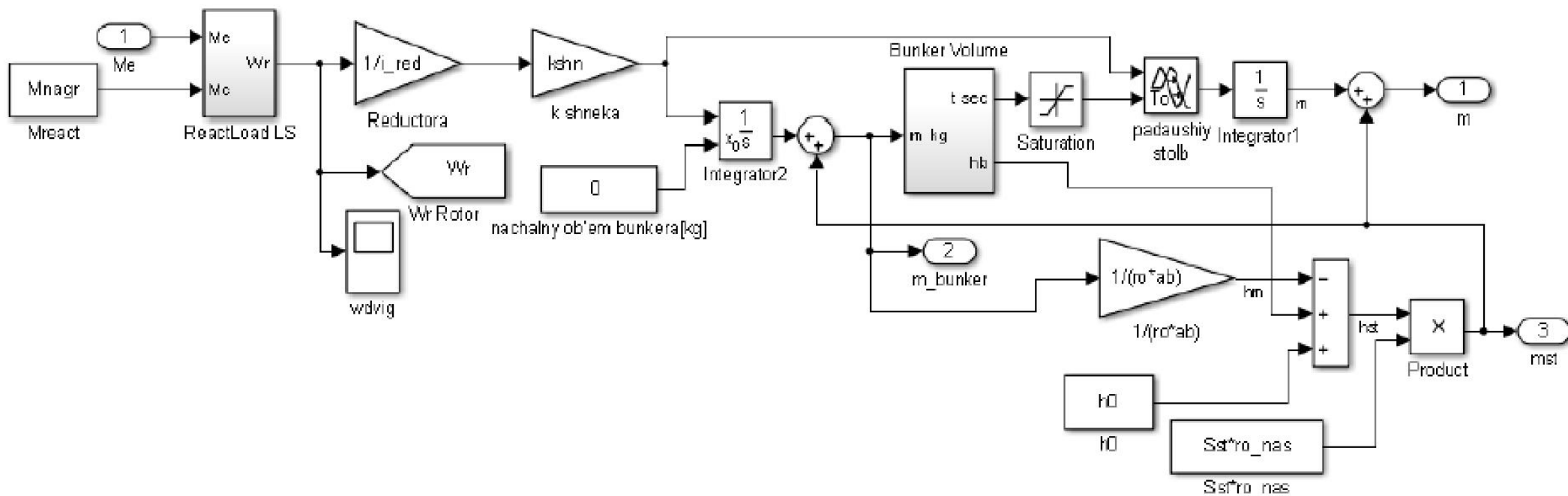


Блоки 1, 7, 8 – входи підсистеми: 1 - електромагнітний момент двигуна; 7 - величина моменту опору типу сухого тертя на валу першої маси; 8 - швидкість двигуна. Блок 6 є виходом даної підсистеми. Блоки 11, 13 враховують величину і знак моменту опору в залежності від напрямку обертання валу двигуна. Група блоків 2, 3, 4, 5, 9, 10, 12, 14 реалізує три зони при зміні моменту опору на його релейного характеристики

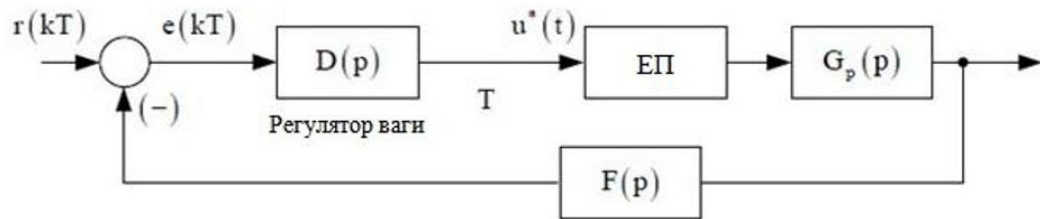
## Модель механічного навантаження в підсистемі середовища Simulink



## Модель шнекового дозатора з урахуванням часової затримки і обчисленням маси падаючого стовпа



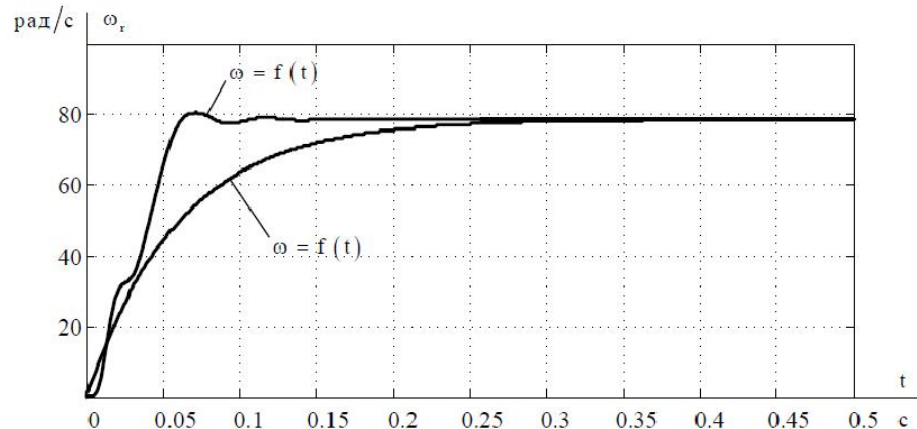
## Структурна схема електроприводу з регулятором ваги



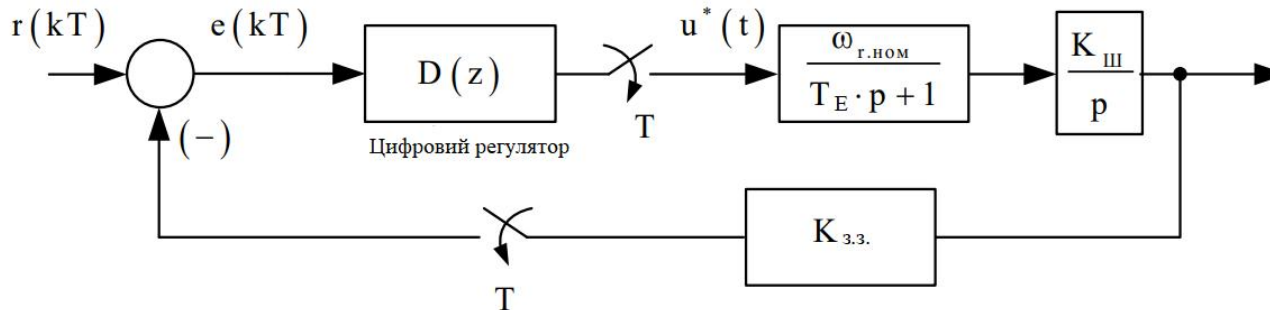
- $D(p)$  - передавальна функція регулятора ваги;
- $ЕП$  - передавальна функція електроприводу;
- $G_p(p)$  - передавальна функція об'єкта керування;
- $F(p)$  - передавальна функція вимірювальної системи

## Перехідний процес АД і еквівалентної аперіодичної ланки

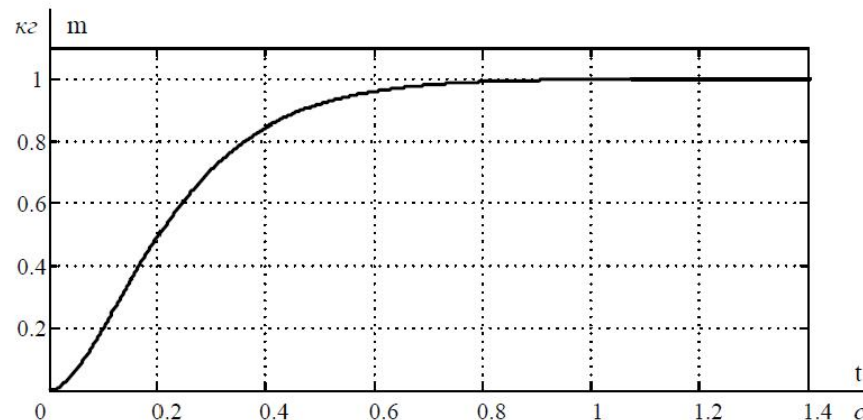
10



## Структурна схема системи управління та об'єкта регулювання



## Перехідний процес оптимізованої системи



## ВИСНОВКИ

За результатами проведених у магістерській роботі теоретичних досліджень сформульовано такі результати:

1. Запропоновано структуру та алгоритмічне забезпечення автоматизованого комплексу вагового багатокomпонентного дозування сипких матеріалів з частотно-регульованим електроприводом, що забезпечують високу продуктивність та необхідну точність дозування.
2. Розроблено математичну та імітаційну моделі частотно регульованого електроприводу у складі автоматизованого комплексу дозування сипких матеріалів з урахуванням зміни висоти «падаючого стовпа» в бункер дозатора.
3. Розроблено алгоритм сигнальної адаптації на основі статистичних даних для керування електроприводом автоматизованого комплексу дозування сипких матеріалів, який дозволив зменшити абсолютну помилку дозування приблизно в 2,5 рази.
4. Розроблено алгоритм управління частотно-регульованим асинхронним електроприводом, що дозволяє дозувати із заданою точністю малі компоненти кормосуміші.