

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

_____ Олександр ДІДИК

« ____ » _____ 2024 р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

«Розробка та дослідження системи автоматичного дозування сипучих матеріалів»

Виконав здобувач II курсу групи АК-23М-2
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

_____ Ігор СКАКУН

« ____ » _____ 2024 р.

Керівник проекту

доцент, канд.техн.наук

_____ Олександр ДІДИК

« ____ » _____ 2024 р.

Рецензент

_____ Іван САВЕЛЕНКО

« ____ » _____ 2024 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра автоматизації виробничих процесів
Рівень вищої освіти магістр
Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри Дідик О.К.

“ ” 2024 року

**ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Скакуна Ігоря Анатолійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи Розробка та дослідження системи автоматичного дозування сипучих матеріалів
- Керівник роботи Дідик Олександр Костянтинович, канд. техн. наук, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
- Строк подання студентом роботи до захисту 02.12.2024 р.
- Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи Розробити та дослідити системи автоматичного дозування сипучих матеріалів 1. Аналіз систем та способів дозування сипучих речовин; 2. Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна; 3. Математичні, імітаційні моделі автоматизованої системи дозування сипучих речовин та її елементів; 4. Синтез керування асинхронним електроприводом в системі дозування сипучих речовин.
- Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Жесан Р.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Аналіз систем та способів дозування сипучих речовин</i>	<i>15.10.24</i>	
2.	<i>Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна</i>	<i>30.10.24</i>	
3.	<i>Математичні, імітаційні моделі автоматизованої системи дозування сипучих речовин та її елементів</i>	<i>15.11.24</i>	
4.	<i>Синтез керування асинхронним електроприводом в системі дозування сипучих речовин</i>	<i>30.11.24</i>	

Дата видачі завдання _____

Керівник роботи _____ О.К. Дідик « ____ » _____ 2024 р.

Завдання прийнято до виконання

Здобувач _____ І.А. Скакун « ____ » _____ 2024 р.

Анотація

на випускну кваліфікаційну роботу студента групи АК-23М-2 Скакуна Ігоря Анатолійовича зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» на тему: «Розробка та дослідження системи автоматичного дозування сипучих матеріалів».

Випускну кваліфікаційну роботу присвячено розробці методів та засобів технологічних процесів дозування сумішей компонентів комбікормів, які забезпечують підвищену точність дозування при максимальному завантаженні. У роботі проведено аналіз фізико-механічних і технологічних властивостей матеріалів, що впливають на процес дозування, розраховані параметри асинхронного електродвигуна, побудовані статичні природні та штучні характеристики електродвигуна під час зміни частоти живильної напруги. Побудовані математичні та імітаційні моделі елементів автоматизованої системи дозування сипучих речовин. Розроблений алгоритм керування електроприводом шнекового живильника, який допоможе досягти необхідної точності та оптимізувати час дозування. Працездатність розробленої системи керування технологічними процесами дозування та змішування сипучих речовин, що застосовується в сільському господарстві підтверджена результатами математичного моделювання.

Ключові слова: автоматизована система, дозування, сипучі речовини, шнековий живильник.

Summary

for the final qualification work of the student of group AK-23M-2 Skakun Ihor Anatoliyovych, speciality 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics" on the topic " Development and research of an automatic dosing system for bulk materials".

The final qualification work is dedicated to the development of methods and tools for technological processes in dosing feed mixture components, ensuring increased dosing accuracy under maximum load conditions. The study analyzes the physical, mechanical, and technological properties of materials affecting the dosing process, calculates asynchronous motor parameters, and constructs both natural and artificial static characteristics of the motor under variable supply voltage frequency. Mathematical and simulation models of elements in the automated bulk materials dosing system are developed. The algorithm for controlling the screw feeder drive is designed to achieve the required accuracy and optimize dosing time. The performance of the developed control system for dosing and mixing bulk materials, applicable in agriculture, is confirmed by mathematical modeling results.

Keywords: automated system, dosing, bulk materials, screw feeder.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Аналіз систем та способів дозування сипучих речовин.....	5
1.1 Основні характеристики сипучих речовин.....	5
1.2 Класифікація основних типів живильників.....	7
1.3 Загальна характеристика методів, засобів автоматизованого переміщення та дозування сипучих речовин.....	10
1.3.1 Автоматичний ваговий дозатор безперервної дії.....	12
1.3.2 Дозатори, поєднані з живильником	13
1.3.3 Дозатори з окремим живильником.....	14
1.3.4 Дозатори з вібраційним живильником.....	16
1.3.5 Багатокомпонентне дозування дозаторами безперебійної дії.....	17
1.4 Автоматизований комплекс дозування і змішування.....	18
2 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна	24
3 Математичні, імітаційні моделі автоматизованої системи дозування сипучих речовин та її елементів	29
3.1 Математична та імітаційна модель асинхронного двигуна з частотним перетворювачем	29
3.2 Математична модель падаючого стовпа сипучих речовин	40
3.3 Імітаційна модель системи дозування сипучих речовин.....	43
4 Синтез керування асинхронним електроприводом в системі дозування сипучих речовин.....	47
4.1 Методика розробки цифрового регулятора ваги в електромеханічній системі	49
4.2 Алгоритм асинхронного електропривода в технології виробництва комбікормів	52
4.3 Алгоритм функціонування завдання електропривода в системі дозування сипучих речовин	55

4.4 Алгоритм коригування похибки, зумовленої масою падаючого стовпа речовини	59
Висновки	67
Список літератури	68
Додаток А	71

Вступ

Актуальність теми. Сипучі речовини широко використовуються в хімічній, харчовій, фармацевтичній, будівельній та інших галузях промисловості.

Однією з основних задач сучасної промисловості є підвищення якості продукції, яку вона випускає, з метою забезпечення її конкурентоспроможності.

Дозуючі пристрої використовуються у багатьох технологічних процесах, від чіткої організації керування ними залежить продуктивність та економія матеріалів, а особливо - отримання підприємством очікуваного прибутку, саме тому підприємства дуже прискіпливо ставляться до вимог до точності дозування - навіть мінімальні відхилення можуть призвести до серйозних збитків.

Тому автоматизація процесів виробництва є одним з найважливіших напрямків розвитку промисловості, а саме впровадженням у виробництво різноманітних автоматів, робототехніки та автоматичних ліній, що сприяє створенню автоматизованих комплексів різного технологічного призначення, гнучких виробничих систем і переходу на рівень автоматизованих технологій.

У зв'язку з вищевикладеним, розробка та дослідження системи автоматичного дозування сипучих речовин, є актуальним завданням яке забезпечить високу точність дозування за умов максимальної продуктивності та дозволить задовольнити зростаючі вимоги до технологічного процесу дозування компонентів комбікормів у різних виробничих умовах.

Метою даної роботи є розробка системи автоматичного дозування сипучих речовин, а саме: комбікормів, та забезпечення її продуктивності шляхом застосування алгоритму керування для асинхронного електроприводу шнекового живильника.

Об'єктом дослідження є електромеханічна система дозування сипучих речовин.

Предмет дослідження - методи та алгоритми керування електроприводом автоматизованої системи дозування сипучих речовин.

Методи дослідження базуються на принципах теорії автоматичного регулювання, електромеханічного перетворення енергії та використанні апарату передавальних функцій. Для оцінки ефективності запропонованих методів у вирішенні поставленої задачі застосовувалося імітаційне моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- розроблена імітаційна модель електропривода шнекового живильника, в якій моделювання шнекового дозатора здійснюється з урахуванням ваги “падаючого стовпа”, яка безперервно змінюється під час накопичення речовини в бункері-дозаторі;

- розроблено алгоритмічне забезпечення для частотно-регульованого асинхронного електроприводу автоматизованого комплексу виробництва комбікормів, яке відрізняється від аналогів здатністю забезпечувати задану точність дозування малих компонентів суміші в загальному бункері-дозаторі.

- для забезпечення точності дозування шнекового живильника з частотно-регульованим електроприводом розроблено алгоритм сигнальної адаптації в реальному часі.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці методики розрахунків параметрів програмного регулятора ваги, що враховує зміну властивостей дозуючої речовини та маси падаючого стовпа.

1 Аналіз систем та способів дозування сипучих речовин

1.1 Класифікація та основні характеристики сипучих речовин

Термін “сипучі” речовини використовують для багатьох матеріалів, які складаються з частинок визначеного розміру: пилоподібних, порошкоподібних, зернистих та кускових. Об’єм сипучого матеріалу складається з різних по формі та розмірам об’єму твердих частинок, що дотикаються одна одну, та пустот між ними, які заповнені повітрям або водою. Як правило, більшість сипучих матеріалів має складний фракційний склад та представляє собою сукупність частинок з випадковим неупорядкованим розташуванням.

В залежності від діаметру d частинок сипуча речовина може бути в наступних станах: пиловидному ($d < 0,05\text{мм}$), порошкоподібному ($0,05\text{мм} < d < 0,5\text{мм}$), дрібнозернистому ($0,5\text{мм} < d < 2\text{мм}$), крупнозернистому ($2\text{мм} < d < 10\text{мм}$), кусковому ($d > 10\text{мм}$) [4].

Речовини та матеріали, які зазвичай відносять до сипучих, суттєво різняться по фізико-механічним характеристикам, які визначають технічні засоби та можливі способи для дозування та транспортування. До основних характеристик можливо віднести:

- гранулометричний склад;
- щільність частинок;
- насипна щільність;
- кут природного нахилу і кут внутрішнього тертя;
- гігроскопічність та вологість;
- здатність до ущільнення під дією зовнішніх сил;
- схильність до когезії та адгезії;
- зсувні та розподільні характеристики;
- комбіновані характеристики.

Для розрахунку керованих живильників та дозаторів в таблиці 1.1 приведені деякі характеристики сипучих речовин.

Таблиця 1.1 - Характеристики деяких сипучих речовин

Матеріал	Розмір частинок, мм	Щільність частинок, $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot 10^3$	Насипна щільність, $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot 10^3$	Кут природного нахилу, град.	Кут внутрішнього тертя, град.	Швидкість витання, м/с
Гіпс	0,02	2,2 - 2,4	0,8 - 0,95	-	-	-
Глина, порошок	0,1	1,6 - 2,0	1,0 - 1,5	-	-	-
Вапно, порошок	0,1	1,3 - 2,0	0,5 - 0,6	30-35	-	-
Вапняк	2,75	2,7	1,25	40	-	-
Клінкер	4,25 2,75 1,3	3,15 3,15 3,15	1,55 1,52 1,57	33-40	-	- - -
Крохмаль	0,15	1,65	0,65 - 0,70	-	--	1,5 -1,8
Пісок	0,5 - 1,0	2,8 - 3,2	1,4 - 1,6	30-45	-	
Пшоно	1,0 - 2,6	1,34	0,71 - 0,75	-	-	8,3 - 9,5
Сировинне борошно	-	-	-	48-50	33	-
Вугільний пил	0,07	1,4 - 1,6	0,80 - 0,85	0	--	0,14
Цемент	0 - 0,2	2,8 - 3,2	0,80 - 1,4	41-42	30	0,22 - 0,34

При дозуванні потрібно слідкувати щоб зберігалася постійність, а саме характеристик дозуючого матеріалу, який заданий; об'ємної маси; середньої величини частинок та вологості.

Вибір способу дозування й типу дозатора залежить від фізико-механічних і технологічних властивостей речовин, що дозуються.

1.2 Класифікація основних типів живильників

Живильники - це механізми, за допомогою яких здійснюється рівномірна регулююча подача сипучих речовин із ємностей до проміжної ємності або до технологічного апарату (безпосередньо або крізь ваговимірювальні пристрої).

Живильник може виступати в ролі пристрою-засувки, тому деякі типи живильників аналогічні бункерним затворам, але відрізняються від них можливістю більш тонкого регулювання потоку сипучої речовини.

Найважливішою вимогою, що пред'являється до живильників, є рівномірність подачі та можливість регулювання. У ряді виробничих процесів живильники застосовуються як прості, надійні та економічні об'ємні дозатори із невисокою точністю.

Класифікація основних типів живильників приведена в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Класифікація основних типів живильників

№ з/п	Тип живильника	Рух робочих елементів	Речовини
	Гравітаційний	Без рухомого робочого елемента	Порошкові
	Стрічковий	Поступальний	Порошкові важкі речовини
			Кускові з середньою масою
	Пластинчастий		Переважно

			крупнокускові
	Барабанний	Обертальний, навкруги горизонтальної вісі	Пиловидні
			Порошкові
			Зернисті
			Дрібнокускові
	Лопатевий	Обертальний	Порошкові
			Зернисті
			Кускові
	Шнековий	Гвинтовий	Порошкові
			Дрібнозернисті
	Тарілчастий	Обертальний, навкруги вертикальної вісі	Порошкові
			Дрібнозернисті
	Маятниковий	Коливальний	Зернисті
			Дрібнокускові
	Лотковий	Коливальний	Крупнозернисті
			Кускові
	Плунжерний	Зворотно-поступальний	Порошкові
			Зернисті
	Вібраційний	Вібраційний	Порошкові
			Зернисті

			Кускові
	Аероційний	-	Пиловидні
			Порошкові

Для формування безперервного потоку сипучої речовини в вагових дозаторах безперервної дії найбільш часто використовують наступні типи живильників, які представлені на рисунку 1.1, а саме: живильник з клапаном (рис. 1.1, *a*), живильник із заслінкою або шибером (рис. 1.1, *б*), секторний або живильник з валом (рис. 1.1, *в*), шнековий живильник (рис. 1.1, *г*), стрічковий живильник (рис. 1.1, *д*), вібраційний живильник (рис. 1.1, *е*).

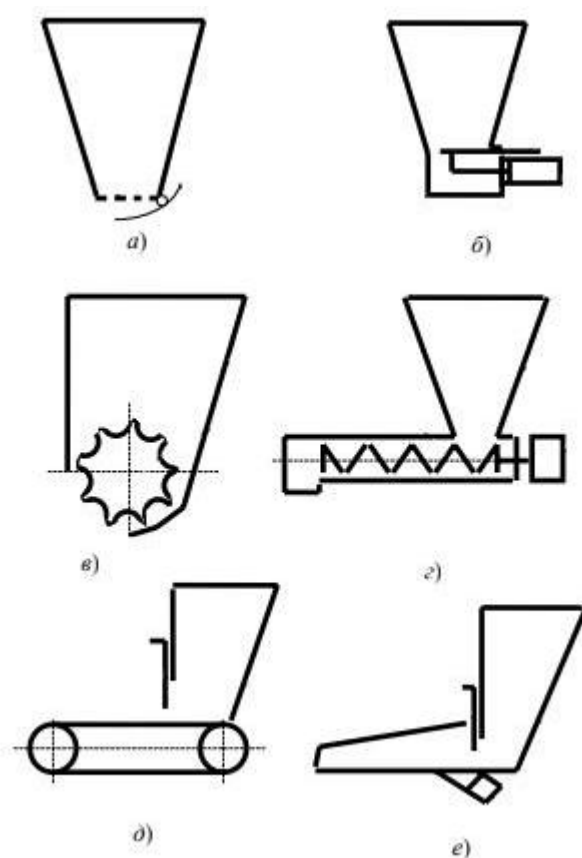


Рисунок 1.1 - Схеми живильників для безперервної подачі сипучих речовин

1.3 Загальна характеристика методів, засобів автоматизованого переміщення та дозування сипучих речовин

Під дозуванням ми розуміємо процес видачі заданої кількості речовин в технологічні апарати для змішування або подальшої переробки, а також фасування матеріалів в тару.

Дозування сипучих речовин здійснюється за допомогою механічних та автоматичних пристроїв, які широко використовуються в періодичних або безперервних технологічних процесах.

До відповідності до структури технологічного процесу дозатори поділяють на дві основні групи: дискретної (періодичної) та безперервної дії.

Дозатори являють собою системи автоматичного дозування з зворотнім зв'язком по об'ємній або ваговій витраті речовин та містять датчик витрат, керуючий пристрій (регулятор витрат) і виконавчий пристрій (живильник). Також системи дозування можуть містити додаткові пристрої, наприклад, для регулювання (налаштування) об'єму дози, контролю надійності, обліку інтегральних витрат та ін.

Дозатори можна класифікувати за наступними функціональними признаками (таблиця 1.3):

Таблиця 1.3 - Класифікація функціональних ознак дозаторів

№ з/п	Параметр (ознака)	Система автоматичного дозування
1	параметром, який визначає витрати	об'ємні
		масові
2	принципом формування витрати	безперервні
		дискретні
3	типом потоку	з безпосереднім переміщенням

		сипучого матеріалу
		з перенесенням сипучого матеріалу в потоці газу або рідини
4	способом управління витратами сипучих матеріалів	з амплітудною модуляцією витрат
		з частотно-імпульсною модуляцією
		з широтно-імпульсною модуляцією
		з комбінованою модуляцією
5	різновидом живильника	з механічним живильником
		з гравітаційним живильником
		з аераційним живильником
		з вібраційним живильником
6	числом агрегатів в системі автоматичного дозування	одноагрегатні
		двоагрегатні
7	видом енергії приводу	механічні
		електромеханічні
		пневматичні
8	наявністю рухомих елементів	з робочими частинами, які рухаються
		без рухомих елементів

Для переміщення сипучих речовин на деякі відстані, у тому числі, і при дозуванні, необхідно докласти зусилля. За методами докладання зусилля, технічні засоби переміщення сипучих речовин можливо поділити на:

- механічні - вплив на матеріал здійснюється під час безпосереднього контакту з робочим органом транспортної машини (живильника);
- гідропневматичні - матеріал переміщується в потоці рідини або газу;
- гравітаційні - матеріал переміщується під дією власної сили тяжкості;
- комбіновані - матеріал переміщується в комбінації вищезгаданих методів.

Основні вимоги, які пред'являються до дозуючих пристроїв:

- забезпечення подачі дозуючої речовини відповідно до заданих параметрів, висока точність дозування та незалежність величини подачі від рівня речовини в бункері;
- широкий діапазон налаштувань вагової витрати та висока ефективність роботи системи автоматичного регулювання;
- наявність приладів для відображення величини регульованого параметра та загальної кількості речовини, що пройшла через дозатор;
- зручність в обслуговуванні, герметичність конструкції та висока надійність у роботі;
- відповідність конструктивного виконання основних і допоміжних вузлів фізико-механічним властивостям дозуючих речовин.

1.3.1 Автоматичний ваговий дозатор безперервної дії

Дозатори безперервної дії забезпечують подачу дозуючих матеріалів безперервним потоком заданої продуктивності з найменшими відхиленнями ваги. Вони є найбільш перспективними, оскільки їх використання дозволяє ефективно здійснювати технологічні процеси. На рисунку 1.2 представлена загальна структурна схема автоматичного вагового дозатору безперервної дії.

Живильник 1 (вібраційний, стрічковий, шнековий та ін.) подає дозуючу речовину з бункеру 2 на конвеєр стрічкового ваговимірювача 3, стрічка якого

рухається з постійною швидкістю. Вага речовини, яка знаходиться на стрічці конвеєру, безперервно перетворюється датчиком ваги 4 в пропорційний електричний або пневматичний сигнал, який надходить в систему реєстрації та автоматичного керування 5, в інтегруючий 6 та реєструючий 7 прилади, регулятор 8, який крізь підсилювач 9 впливає на живильник, тим самим забезпечуючи його продуктивність, яка дорівнює заданій.

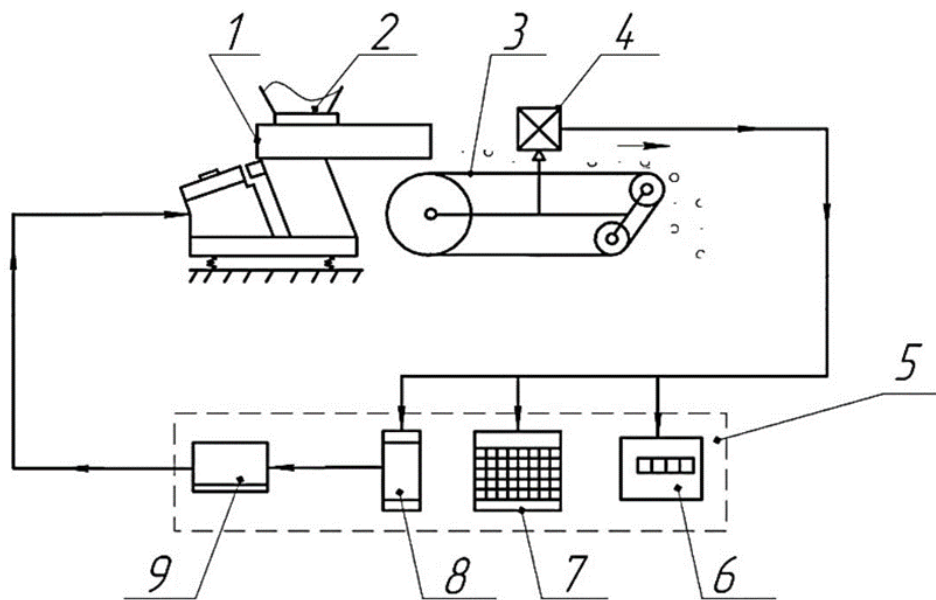


Рисунок 1.2 – Загальна структурна схема автоматичного вагового дозатору безперервної дії

1.3.2 Дозатори, поєднані з живильниками

В промисловості застосовуються дозатори, в яких стрічка вагового конвеєру поєднана з стрічкою стрічкового живильника. Такі установки дозування прості по будові, компактні, надійні, недорогі за ціною, але поряд з тим вирізняються невисокою точністю ваговимірювання. Ваговимірювачем в таких дозаторах є або ваговий ролик під стрічкою, або ваговий конвеєр, що хитається.

Схема вищезгаданого дозатора з ваговимірювальним роликом під стрічкою, який має постійну швидкість, наведено на рисунку 1.3. Система регулювання в даному випадку пряма - переміщення вагового ролика передаються через систему важелів на засувку, яка регулює подачу речовини з бункера.

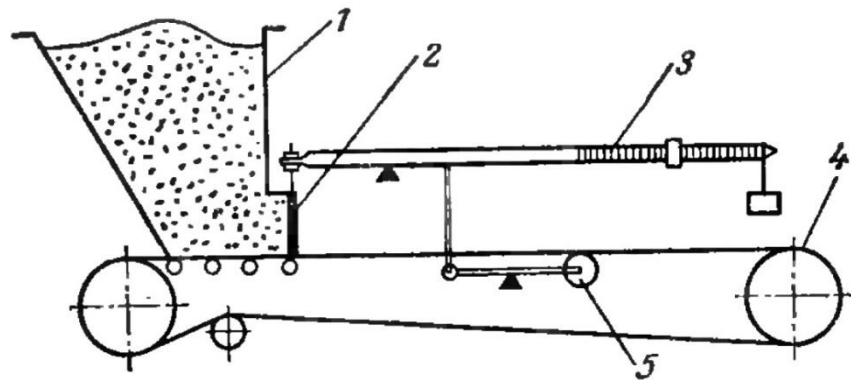


Рисунок 1.3 – Схема вагового дозатора з постійною швидкістю стрічки:

- 1 – бункер; 2 – засувка; 3 – вагове коромисло; 4 – транспортер;
5 – ваговимірювальний ролик.

1.3.3 Дозатори з окремим живильником

Удосконалення конструкцій дозаторів безперервної дії призвело до розподілу на самостійні ділянки живильного та вагового пристрою.

В цих конструкціях в залежності від фізико-механічних властивостей дозуючих речовин використовують живильники різних видів: стрічкові, пластинчаті, шнекові, електровібрувальні, тарільчасті та ін. В якості ваговимірювального пристрою в дозаторах цієї системи використовують стрічкові транспортери з ваговим пристроєм.

При наявності окремого живильного пристрою знищуються небажані зусилля, які викривляють показання ваг. На чутливий елемент вагової системи навантаження діє не через стрічку, а через транспортер в цілому. Стрічка в даному випадку не діє на вагову ділянку, тому нерівномірний тиск речовини,

яка потрапляє з бункера на стрічку, ті інші небажані зусилля не впливають на ваговій системі. В дозаторах з окремими живильними та ваговими пристроями похибка дозування зменшується.

Дозатори з окремими стрічковими живильниками зустрічаються в різному конструктивному виконанні.

В одному з варіантів транспортер має так названу консольну підвіску (один кінець розташовується на нерухомій опорі, інший з'єднаний з ваговим механізмом), в іншому – транспортер підвішений.

На рисунку 1.4 представлений дозатор з індуктивним датчиком. Він складається з двох транспортерів, які рухаються в протилежному напрямку. Верхній транспортер є стрічковим живильником, він використовується для подачі дозуючої речовини з бункера. Нижній транспортер є ваговим, на ньому за допомогою підвісних гирь встановлюють потрібне навантаження.

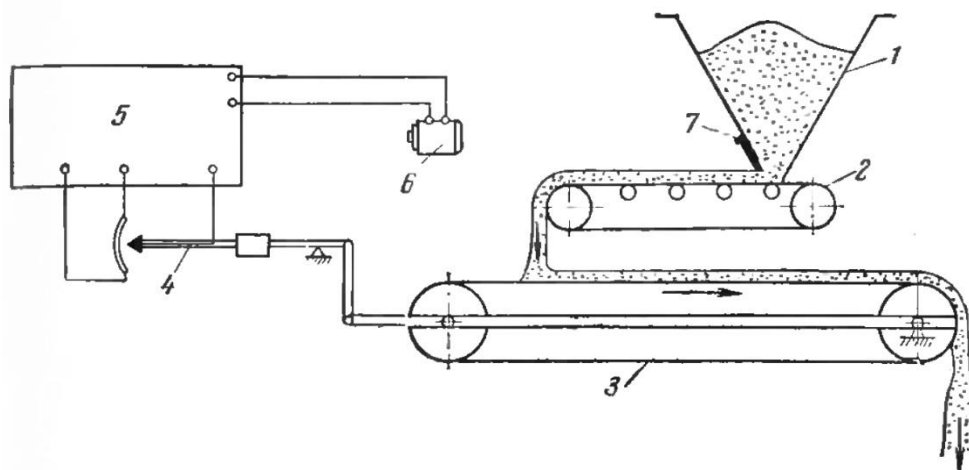


Рисунок 1.4 – Ваговий дозатор з окремим стрічковим живильником: 1 – бункер; 2 – стрічковий живильник; 3 – ваговимірювальний транспортер; 4 – реостатний датчик; 5 – регулятор; 6 – сервомотор.

Принцип регулювання заданої продуктивності заснована на зміні швидкості руху стрічки транспортера-живильника. Реостатний датчик видає сигнал про зміну навантаження, точність дозування $\pm 1\%$.

1.3.4 Дозатори з вібраційним живильником

Дозатори з вібраційними живильниками знаходять широке використання, і якщо порівнювати їх з дозаторами, які оснащені стрічковими або іншими живильниками, мають ряд переваг.

Електромагнітні вібраційні живильники дозволяють отримати більшу точність та плавність регулювання подавання дозуючої речовини за рахунок зміни амплітуди колювання. Вони володіють незначною інерцією та малим часом спрацювання системи автоматики, що дозволяє досягати швидкодії та високої точності дозування.

На рисунку 1.5 наведена схема вагового дозатора з датчиком ваги магнітопружної дії. При зміні ваги речовини змінюються і магнітні властивості невеликих рухливих деталей, виготовлених з особливої сталі. Ця зміна вимірюється електричним способом. У датчика, побудованого по такому принципу, змінюється індуктивний стан пропорційно до сили ваги, яка впливає на нього. При цьому магнітопружний датчик ваги через електронний регулятор впливає на вібраційний живильник, що завантажує стрічковий транспортер.

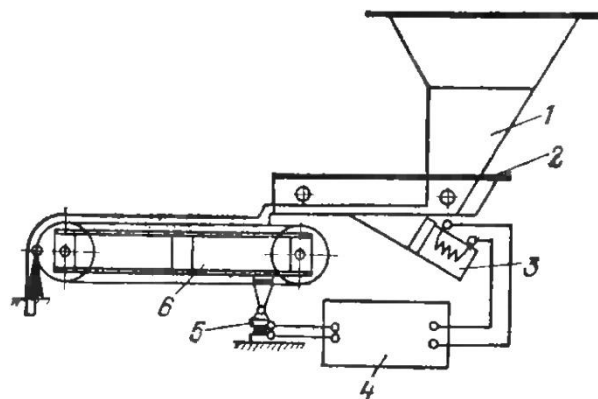


Рисунок 1.5 – Вібраційний ваговий дозатор з датчиком ваги магнітопружного типу: 1 – бункер; 2 – лоток живильника; 3 – електромагнітний вібратор; 4 – електронний регулятор; 5 – магнітопружний датчик ваги; 6 – вагова рама.

1.3.5 Багатокомпонентне дозування дозаторами безперервної дії

Останнім часом на практиці багатокомпонентного дозування найбільшого поширення отримали вагові дозатори безперервної дії. Дозування усіх компонентів здійснюється одночасно, оскільки безперервна подача дозуючої речовини усуває можливість послідовного дозування окремих складових суміші. Кожний дозатор видає безперервним потоком в заданій кількості по вазі визначену речовину багатокомпонентної суміші. При цьому для поліпшення роботи багатокомпонентної установки використовують групову установку дозаторів. На рисунку 1.6 наведена система з трьох вагових дозаторів, встановлених поступово, для безперервного дозування (ваговимірювальні пристрої дозаторів не вказані). Речовина, яка подається дозаторами на збірний конвеєр, направляється до загального змішувача. Режим роботи кожного дозатора організовується так, що вагове співвідношення всіх компонентів суміші залишається постійним та відповідає заданій пропорції. Коли завершується робота одного з дозаторів установки, всі дозатори також завершують роботу до налагоджування процесу, що досягається блокуванням.

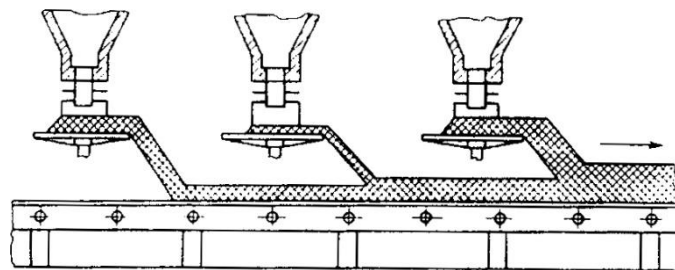


Рисунок 1.6 – Схема безперервного багатокомпонентного вагового дозування
(ваговимірювальна частина не показана)

В деяких технологічних процесах дозволяється зміна загального значення витрати суміші в межах, що не порушують нормальну роботу змішувача.

Але складання суміші не може бути забезпечене постійною та рівномірною подачею усіх дозуючих речовин. Іноді суміш виробляється в

залежності від вироблення якось продукту і у зв'язку з цим подаються інші речовини, в необхідній пропорції. В цьому випадку один з дозаторів працює як той, що задає. Схема відповідної установки наведена на рисунку 1.7. Стрічковий транспортер з ваговимірювальними роликами працює без автоматичного регулювання, а сигнал, який відповідає витраті, подається на автоматичний ваговий дозатор, де порівнюється з сигналом, який дорівнює фактичній витраті через автоматичний ваговий дозатор, і різницевий сигнал використовується для керування роботою автоматичного вагового дозатора, що дозволяє підтримувати співвідношення між першим та другим потоками.

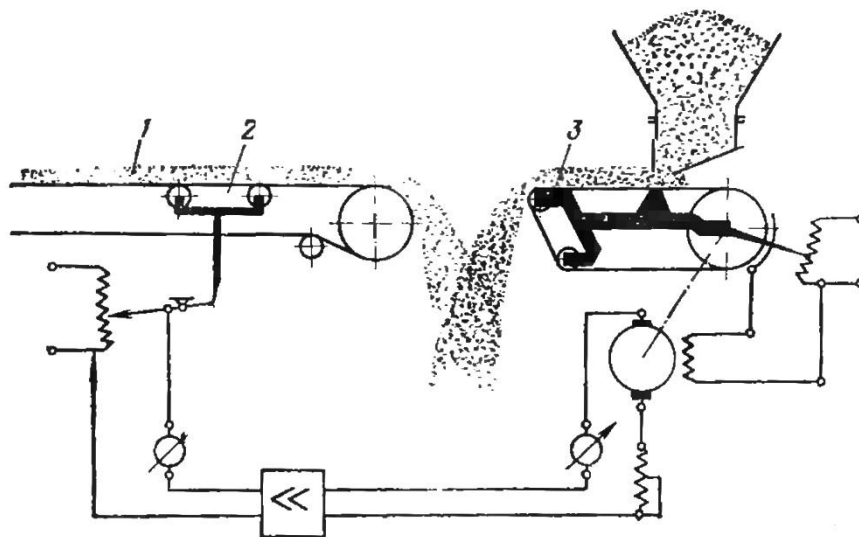


Рисунок 1.7 – Безперервне вагове дозування двох компонентів конвеєрними вагами та автоматичним ваговим дозатором: 1 – транспортер; 2 – ваговимірювальні ролики; 3 – автоматичний ваговий дозатор.

1.4 Автоматизована система керування технологічним процесом дозування та змішування сипучих речовин, що застосовується в сільському господарстві

Продуктивність праці та ефективність виробництва в багатьох випадках визначається ступенем автоматизації технологічних процесів, і особливо

важливим для підприємств харчової та переробної промисловості - достовірністю інформації про потоки сировини та якості продукції.

Не завжди можливо вирішити задачу управління технологічними процесами тільки шляхом стабілізації вхідних витрат матеріалів за допомогою дозаторів з постійною продуктивністю. У зв'язку з цим виникає необхідність безперервного або дискретного коригування завдання системі автоматичного дозування у відповідності до ситуації, яка змінюється. В таких випадках системи автоматичного дозування виконують функції високоточного виконавчого пристрою автоматичної системи регулювання. Структура такої системи, яка містить систему автоматичного дозування з внутрішнім зворотним зв'язком як виконуючого пристрою, показана на рисунку 1.8, де ТОК - технологічний об'єкт керування, САД - система автоматичного дозування, ВК - виконуючий пристрій САД (живильник), P_B - регулятор витрат, P_{TP} - регулятор технологічного параметру, $F_{зд}$, F - задане та поточне значення витрат речовини, $Y_{зд}$, Y - задане та поточне значення технологічного параметра, μ_Y і μ_F - вихідні сигнали регуляторів технологічного параметра та витрат відповідно.

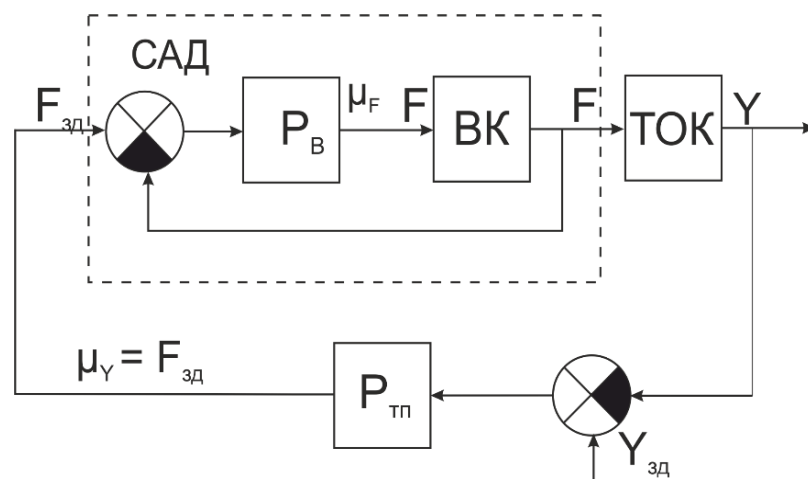


Рисунок 1.8 - Структура автоматичної системи регулювання технологічного параметра

У зв'язку з високими вимогами до точності дозування та ефективності виробництва, розроблена автоматизована система керування технологічним процесом (далі - АСК ТП) дозування змішування сипучих речовин, функціональна схема якої наведена на рисунку 1.9.

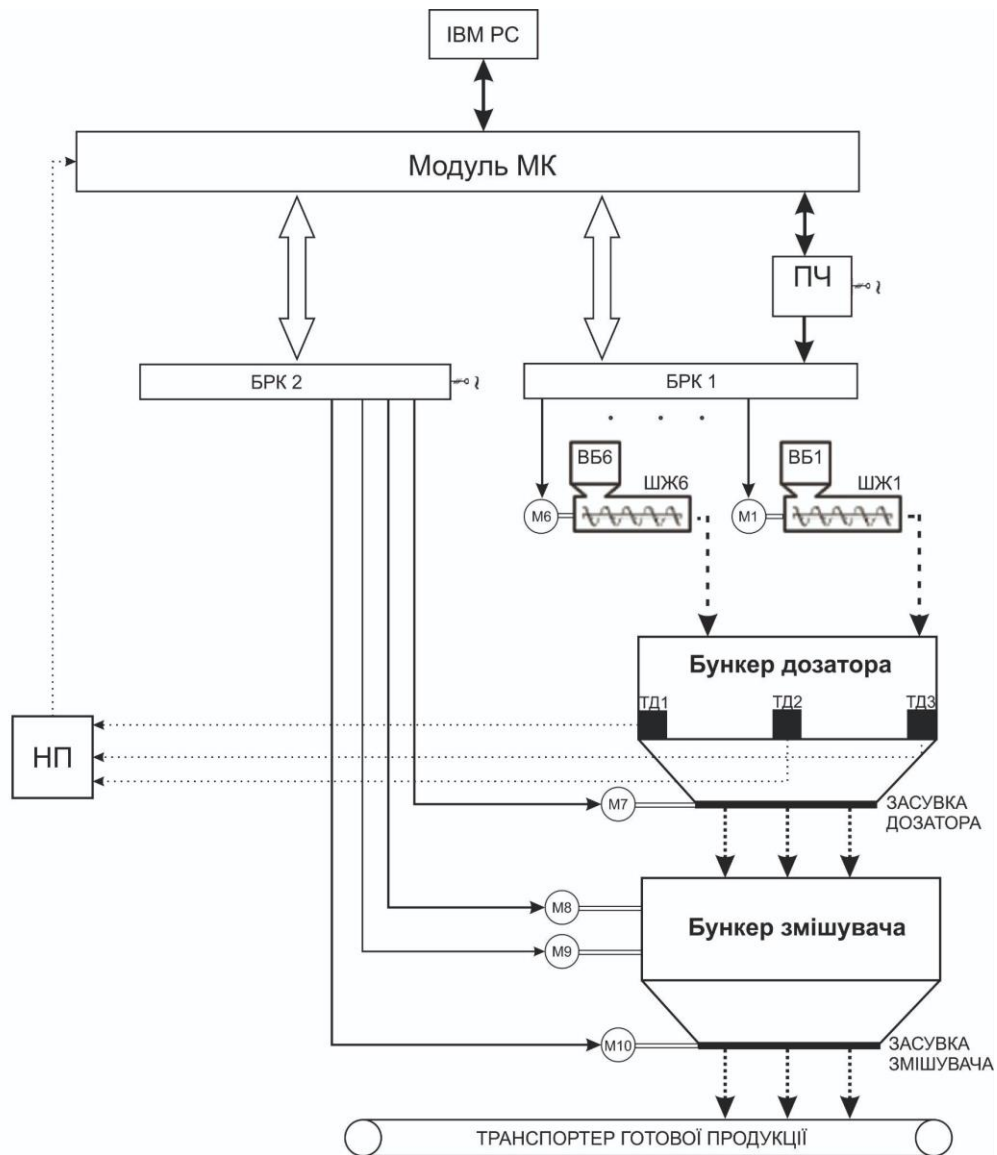


Рисунок 1.9 - Функціональна схема АСК ТП дозування змішування сипучих речовин, що застосовується в сільському господарстві

До основних складових схеми входять:

- витратні бункери (ВБ), які містять дозуючі компоненти (ячмінь, горох, пшениця, шрот соняшниковий, концентрат) - 6 шт.;

- шнекові живильники (ШЖ), оснащені асинхронними електродвигунами, - 6 шт.;
- бункер-дозатор, який має вантажопідйомність до 1 т та встановлений на трьох тензодатчиках (ТД) (рис. 1.10);
- бункер-змішувач, який облаштований асинхронним двигуном змішувача та двигуном розпушувача (рис. 1.11);
- бункер для відвантаження готової продукції з ємнісним датчиком рівня;
- транспортна підсистема для відвантаження готової продукції.



Рисунок 1.10 - Бункер-дозатор



Рисунок 1.11 - Бункер-змішувач

Сировина надходить до витратних бункерів із автомобільного терміналу. Завантаження одного бункера об'ємом 50 т займає щонайменше 3 години. Після завершення завантаження витратних бункерів компоненти послідовно транспортуються до бункера-дозатора. Саме в ньому здійснюється дозування відповідно до заданих рецептів. Сигнал, пропорційний поточній вазі, зчитується з трьох тензодатчиків та потрапляє до нормуючого підсилювача (НП), в якому сигнал додається, нормалізується до стандартного струмового сигналу, та в такому вигляді надходить до контролера. Після завершення дозування всіх компонентів маса спрямовується до бункера-змішувача, де час змішування компонентів залежить від обраного рецепта та відрізняється один

від одного. Готова суміш передається на транспортер для відвантаження, а відвантаження готової продукції здійснюється через автомобільний термінал.

За допомогою одного перетворювача частоти (ПЧ), підключеного через блок релейної комутації (БРК1) відповідно по сигналів мікроконтролера, здійснюється керування двигунами шнекових живильників. Двигун змішувача (М8) та розпушувача (М9) підключається до мережі через блок релейної комутації (БРК2), який також керується мікроконтролером.

Цю систему розглянемо детальніше, зокрема виконаємо розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна.

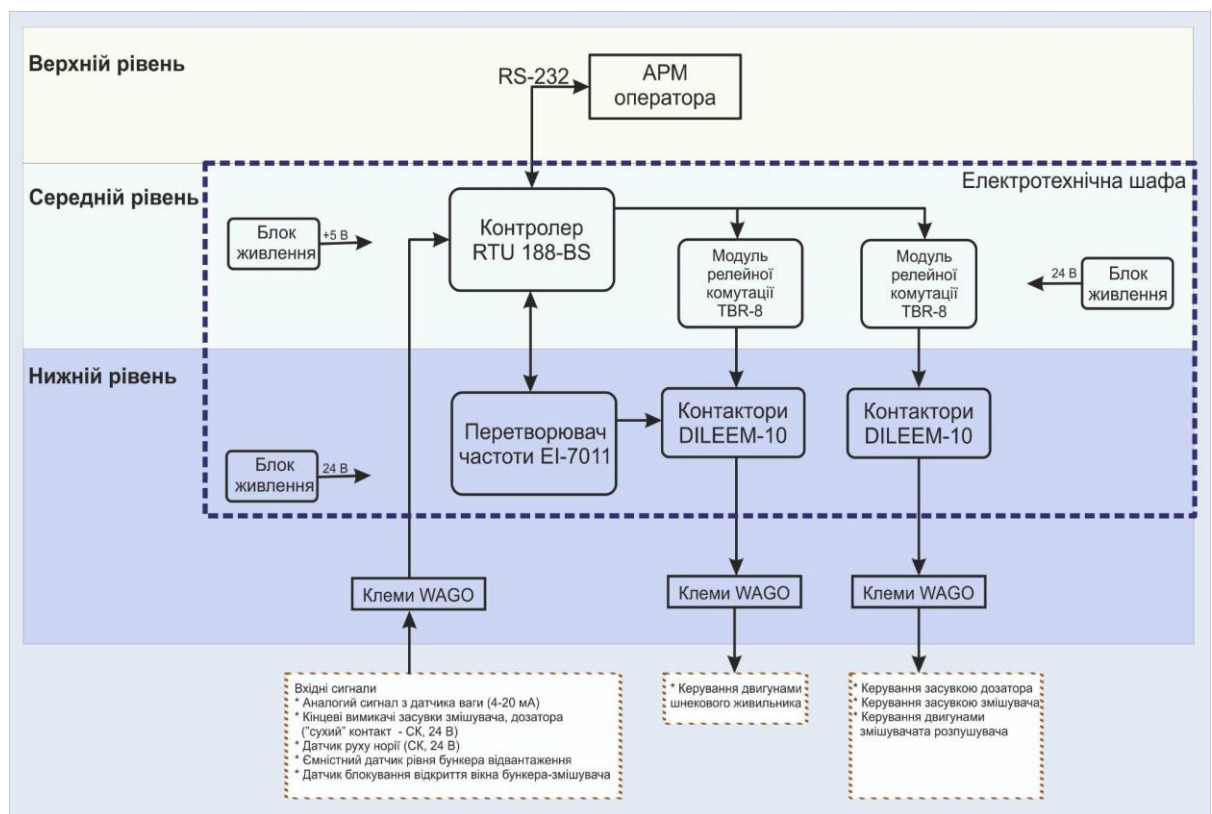


Рисунок 1.12 - Структурна схема автоматизованої системи керування технологічним процесом дозування та змішування сипучих речовин

Автоматизована система керування технологічним процесом дозування та змішування сипучих речовин має трирівневу структуру (рис. 1.12). На нижньому рівні розміщуються датчики та виконавчі прилади. На середньому

рівні розміщуються керуючий контролер та модулі релейної комутації. На верхньому ж рівні - автоматизоване робоче місце (далі - АРМ) оператора на базі персонального комп'ютера. Взаємозв'язок між верхнім та середнім рівнем забезпечується через інтерфейс RS-232 на фізичному рівні за допомогою протоколу, спеціально розробленого для цього проекту.

Двигуни засувки бункера-дозатора та бункера-змішувача, двигуни змішувача та розпушувача вмикаються в мережу безпосередньо крізь силові контактори фірми Moeller. Усі автоматичні вимикачі, які використовуються також цієї фірми. Для шнекових живильників потрібно плавне регулювання швидкості, у зв'язку з цим їх двигунами керують за допомогою перетворювача частоти, в якості якого виступає перетворювач EI-7011. Усі двигуни приєднуються до одного і того ж самого перетворювача частоти по черзі через комутатор з силових контакторів.

Три тензодатчики МК2-1-С3 здійснюють вимірювання поточної ваги бункера-дозатора. Сигнали від даних тензодатчиків подаються до підсумовуючого блоку, а потім - до нормуючого підсилювача, який знаходиться на близькій відстані від датчиків. У підсилювачі сигнал підсилюється, проходить гальванічну ізоляцію та нормалізується до стандартного струмового рівня 4...20 мА. У такому вигляді інформація передається до контролера.

На середньому рівні основним приладом є контролер RTU188-BS, який має 16 дискретних неізольованих входів-виходів, 16 оптоізольованих входів, 8 аналогових входів з роздільною здатністю 12 біт, послідовні порти RS-232 (порт 0) та RS-232/RS-485 (порт 1).

Сполучення порту вихідних сигналів контролерів та обмоток силових контакторів здійснюється через 2 модуля релейної комутації TBR-8, які використовуються для керування силовими контакторами двигунів змішувача та дозатора, а також для комутації вихідного ланцюга частотного перетворювача.

Контролер та модулі релейної комутації заживлені від джерел фірми Siemens з вихідними номіналами 5В та 24В.

2 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

На початку розробки автоматизованої системи дозування сипучих речовин необхідно виконати розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна.

Виконуємо необхідні розрахунки для заміщення асинхронного двигуна AIP90L4, технічні характеристики якого представлені у таблиці 2.1 [22].

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики асинхронного двигуна AIP90L4

Задані величини	Умовне позначення	Одиниця виміру	Числове значення
Номінальна напруга	U_n	В	220
Номінальна лінійна напруга	U_L	В	380
Потужність двигуна	$P_{\text{дв}}$	кВт	2,2
Коефіцієнт корисної дії	η_n	%	80
Синхронна частота обертів	n_0	об/хв	1500
Номінальна частота обертів	n_c	об/хв	1400
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi_n$	-	0,81
Номінальне ковзання	S_n	-	0,067
Ставлення пускового струму до номінального	k_i	-	6,8
Ставлення пускового обертового моменту сили до номінального	k_n	-	2,3
Ставлення максимального	k_{max}	-	2,3

обертального моменту сили до номінального			
Число пар полюсів	p	-	2
Частота струму	f	Гц	50
Число фаз двигуна	m	-	3

Розраховуємо кутову швидкість обертання двигуна:

$$\omega_c = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3.14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад/с}, \quad (2.1)$$

де n_0 - синхронна частота обертів двигуна.

Номінальна частота обертання двигуна:

$$n_{\text{дв}} = (1 - S_n) \cdot n_0 = (1 - 0.067) \cdot 1500 = 1399.5 \text{ об/хв}, \quad (2.2)$$

де S_n – номінальне ковзання.

Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_{\text{дв}} = (1 - S_n) \cdot \omega_c = (1 - 0.067) \cdot 157 = 146.481 \text{ рад/с}, \quad (2.3)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{дв}}}{\omega_{\text{дв}}} = \frac{2200}{146.481} = 15.019, \quad (2.4)$$

де $P_{\text{дв}}$ – потужність двигуна.

Після проведених розрахунків визначаємо номінальний фазний струм:

$$I_\phi = \frac{P_{\text{дв}}}{m \cdot U_n \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{2200}{3 \cdot 220 \cdot 0.81 \cdot 0.8} = 5.14 \text{ А}, \quad (2.5)$$

де U_n – номінальна напруга, η_n – коефіцієнт корисної дії, $\cos \varphi_n$ – коефіцієнт потужності, m – число фаз двигуна.

Для заміщення асинхронного двигуна використовуємо Т-подібну схему заміщення для однієї фази двигуна, що приведена на рисунку 2.1.

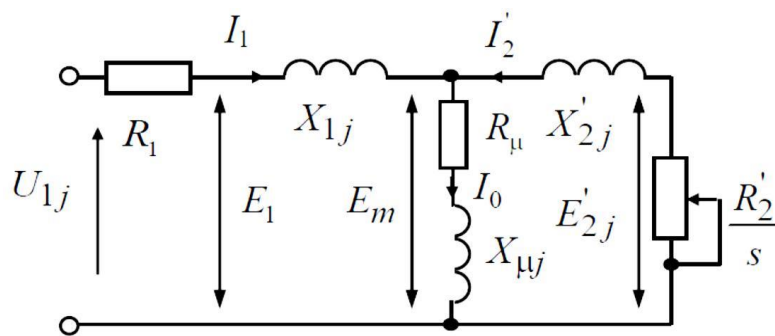


Рисунок 2.1 - Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Відомо, якщо завантажити асинхронний двигун на 10-15% менше, ніж його номінальне завантаження, то отримаємо найбільший коефіцієнт корисної дії. В теперішній час асинхронні двигуни проектуються так, тому що більшість з них, працюють з певним недовантаженням. Тому коефіцієнт корисної дії при номінальному навантаженні та при навантаженні $p^*=0.75$ майже рівні між собою.

Коефіцієнт потужності при номінальному навантаженні відрізняється від коефіцієнта потужності при навантаженні $p^*=0.75$, і варто зазначити, що ця різниця залежить від потужності двигуна (рис. 2.2).

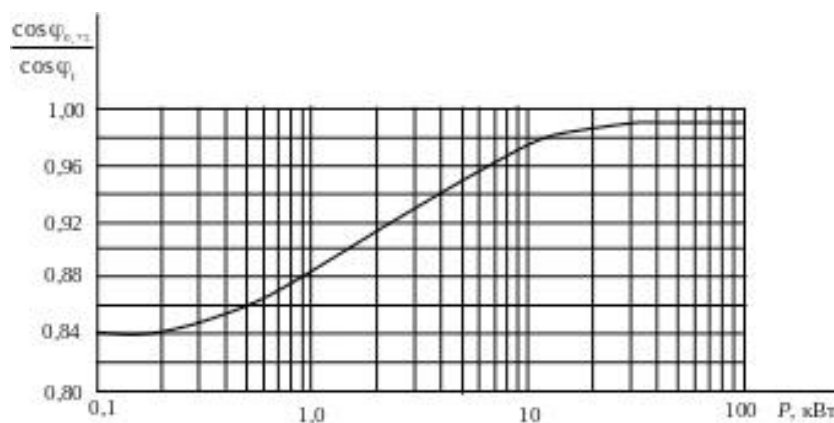


Рисунок 2.2 – Залежність коефіцієнта потужності від потужності асинхронного двигуна

Тому розраховуємо коефіцієнт потужності при частковому завантаженні:

$$\cos \varphi_p = 0.92 \cdot \cos \varphi_n = 0.92 \cdot 0.81 = 0.745 \quad (2.6)$$

Припустимо, що коефіцієнт навантаження двигуна дорівнює $p^*=0.75$, тоді струм статора дорівнює:

$$I_1 = \frac{p^* \cdot P_{\text{дв}}}{m \cdot U_n \cdot \cos \varphi_p \cdot \eta_n} = \frac{0.75 \cdot 2200}{3 \cdot 220 \cdot 0.745 \cdot 0.8} = 4.195 \text{ A} \quad (2.7)$$

Також потрібно розрахувати для асинхронного двигуна струм його холостого ходу:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_1^2 - \left(\frac{p^* \cdot I_\phi \cdot (1 - S_n)}{1 - p^* \cdot S_n} \right)^2}{1 - \left(\frac{p^* \cdot (1 - S_n)}{1 - p^* \cdot S_n} \right)^2}} = \sqrt{\frac{4.195^2 - \left(\frac{0.75 \cdot 5.14 \cdot (1 - 0.013)}{1 - 0.75 \cdot 0.013} \right)^2}{1 - \left(\frac{0.75 \cdot (1 - 0.013)}{1 - 0.75 \cdot 0.013} \right)^2}} = 2.535 \text{ A} \quad (2.8)$$

Розраховуємо коефіцієнт, враховуючий втрати напруги від струму холостого ходу:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_\phi} = 1 + \frac{2.535}{2 \cdot 6.8 \cdot 5.14} = 1.04, \quad (2.9)$$

де k_i - ставлення пускового струму до номінального.

$$A_1 = \frac{m \cdot U_n^2 \cdot (1 - S_n)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\text{max}} \cdot P_{\text{дв}}} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0.067)}{2 \cdot 1.04 \cdot 2.3 \cdot 2200} = 12.871, \quad (2.10)$$

де k_{max} - ставлення максимального обертового моменту сили до номінального.

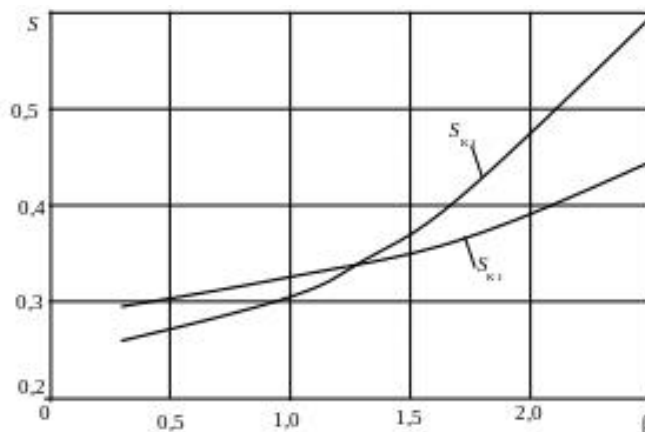


Рисунок 2.3 – Графік залежності коефіцієнтів ковзання

Таблиця 2.1 – Значення величин $S_{K1}(\beta)$ та $S_{K2}(\beta)$

β	0.3	1	1.3	1.7	2.5
$S_{K1}(\beta)$	0,29	0,325	0,342	0,37	0,443
$S_{K2}(\beta)$	0,257	0,313	0,346	0,401	0,592

Задаючи ряд значень β розраховуються та будуються графіки залежності $S_{K1}(\beta)$ та $S_{K2}(\beta)$ відповідно до значень таблиці 2.1. В точці перетину буде значення β , яке потрібно, згідно до графіку залежності коефіцієнтів $\beta=1.3$.

Відповідно до формули Клосса, розраховуємо величину критичного ковзання:

$$S_{кр} = S_H \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - (1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1))}}{1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} =$$

$$= 0.067 \cdot \frac{2.3 + \sqrt{2.3^2 - (1 - 2 \cdot 0.067 \cdot 1.3 \cdot (2.3 - 1))}}{(1 - 2 \cdot 0.067 \cdot \beta \cdot (2.3 - 1))} = 0.367 \quad (2.11)$$

Визначаємо значення активного опору ротора, який приведений до обмотки статора асинхронного двигуна:

$$R_2' = \frac{A_1}{C_1 \cdot \left(\beta + \frac{1}{S_{кр}} \right)} = \frac{12.871}{1.04 \cdot \left(1.3 + \frac{1}{0.367} \right)} = 3.075 \text{ Ом} \quad (2.12)$$

Розраховуємо активний опір статора:

$$R_1 = \beta \cdot C_1 \cdot R_2' = 1.3 \cdot 1.04 \cdot 3.075 = 4.157 \text{ Ом} \quad (2.13)$$

Для того, щоб знайти індуктивний опір короткого замикання X_K , визначаємо параметр γ :

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{S_{кр}^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0.367^2} - 1.3^2} = 2.39, \quad (2.14)$$

$$X_K = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 1.3 \cdot 1.04 \cdot 3.075 = 4.157 \text{ Ом}. \quad (2.15)$$

З наступних виразів визначаємо індуктивний опір розсіювання фази роторної X_2' та статорної обмотки X_1 :

$$X_2' = \frac{0.58 \cdot X_{\kappa}}{C_1} = \frac{0.58 \cdot 4.157}{1.04} = 2.318 \text{ Ом}, \quad (2.16)$$

$$X_1 = 0.42 \cdot X_{\kappa}' = 0.42 \cdot 4.157 = 1.746 \text{ Ом}. \quad (2.17)$$

Визначаємо електрорушійну силу гілки намагнічування E_m :

$$\begin{aligned} E_m &= \sqrt{(U_n \cdot \cos \varphi_n - R_1 \cdot I_{\phi})^2 + (U_n \cdot \sqrt{1 - \cos \varphi_n} - X_1 \cdot I_{\phi})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0.81 - 4.157 \cdot 5.14)^2 + (220 \cdot \sqrt{1 - 0.81} - 1.74 \cdot 5.14)^2} = 217.68 \text{ В} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Тоді індуктивний опір намагнічування X_m дорівнює:

$$X_m = \frac{E_m}{I_0} = \frac{217.68}{2.535} = 85.869 \text{ Ом} \quad (2.19)$$

3 Математичні, імітаційні моделі автоматизованої системи дозування сипучих речовин та її елементів

3.1 Математична та імітаційна модель асинхронного двигуна з частотним перетворювачем

Створення математичної моделі шнекового дозатора необхідне для оцінки працездатності розробленої системи дозування сипучих речовин. Це дозволяє протестувати алгоритми компенсації похибок, які виникають при дозуванні, з урахуванням специфічних характеристик речовин, що дозуються, зокрема випадкових змін властивостей суміші з часом.

На рисунку 3.1 представлена загальна функціональна схема електротехнічного комплексу дозування сипучих речовин, до складу його входять: витратний бункер (ВБ), шнековий дозатор (ШД), бункер-дозатор (БД). Перетворювач частоти - асинхронний двигун (ПЧ-АД) здійснює мікропроцесорне керування шнековим дозатором.

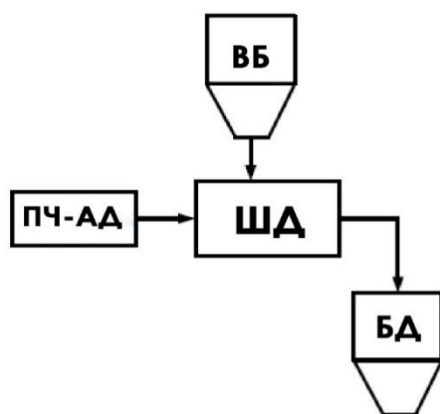


Рисунок 3.1 Функціональна схема електротехнічного комплексу дозування сипучих речовин

Математичний опис процесів в електромеханічних перетворювачах базується на складанні та розв'язанні диференціальних рівнянь Кірхгофа. Найбільш точним способом моделювання процесів в асинхронному двигуні є трифазна математична модель у загальмованій системі координат [12, 24]. Такий підхід дає змогу виключити зі системи диференціальних рівнянь взаємну індукцію між фазами та компоненти електрорушійної сили, що виникають через обертання.

Приймаємо наступні припущення у процесі моделювання асинхронного двигуна:

- значення активних опорів та індуктивностей залишаються постійними;
- втрати на гістерезис і від вихрових струмів у сталевих елементах відсутні;

- ненасичена магнітна система;
- індукція в повітряному проміжку має рівномірний розподіл.

З вищезгаданих припущень формуються основні положення:

- в повітряному зазорі синусоїдальний розподіл потоку, що створений обмотками статора та ротора;
- незалежні один від одного робоче поле і поле розсіювання, а магнітне поле плоскопаралельне.

Для уніфікації опису процесів у статичному та роторному колі використовуються коефіцієнти приведення. Приведення параметрів обмоток до однакової кількості витків дозволяє [17]:

- формулювати рівняння асинхронного двигуна без врахування кількості витків в обмотці;
- використовувати єдину систему базових величин для параметрів статора і ротора при переведенні до відносних одиниць;
- створювати еквівалентні електричні схеми заміщення.

Рівняння для напруги фаз статора асинхронного двигуна:

$$U_{s\alpha} = r_{s\alpha} \cdot i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt}; \quad (3.1)$$

$$U_{s\beta} = r_{s\beta} \cdot i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt}; \quad (3.2)$$

$$U_{s\gamma} = r_{s\gamma} \cdot i_{s\gamma} + \frac{d\psi_{s\gamma}}{dt}. \quad (3.3)$$

Рівняння для напруги фаз ротора:

$$-U_{r\alpha} = r_{r\alpha} \cdot i_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + (\psi_{r\beta} - \psi_{r\gamma}) \cdot \omega_r / \sqrt{3}; \quad (3.4)$$

$$-U_{r\beta} = r_{r\beta} \cdot i_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + (\psi_{r\gamma} - \psi_{r\alpha}) \cdot \omega_r / \sqrt{3}; \quad (3.5)$$

$$-U_{r\gamma} = r_{r\gamma} \cdot i_{r\gamma} + \frac{d\psi_{r\gamma}}{dt} + (\psi_{r\alpha} - \psi_{r\beta}) \cdot \omega_r / \sqrt{3}. \quad (3.6)$$

Потокозчеплення статора:

$$\psi_{s\alpha} = L_{s\alpha} \cdot i_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{s\beta} + i_{s\gamma}) + L_m \cdot \left(i_{r\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\beta} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\gamma} \right); \quad (3.7)$$

$$\psi_{s\beta} = L_{s\beta} \cdot i_{s\beta} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{s\gamma} + i_{s\alpha}) + L_m \cdot \left(i_{r\beta} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\gamma} \right); \quad (3.8)$$

$$\psi_{s\gamma} = L_{s\gamma} \cdot i_{s\gamma} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{s\beta} + i_{s\alpha}) + L_m \cdot \left(i_{r\gamma} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{r\beta} \right). \quad (3.9)$$

Потокозчеплення ротора:

$$\psi_{r\alpha} = L_{r\alpha} \cdot i_{r\alpha} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{r\beta} + i_{r\gamma}) + L_m \cdot \left(i_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\beta} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\gamma} \right); \quad (3.11)$$

$$\psi_{r\beta} = L_{r\beta} \cdot i_{r\beta} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{r\gamma} + i_{r\alpha}) + L_m \cdot \left(i_{s\beta} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\alpha} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\gamma} \right); \quad (3.12)$$

$$\psi_{r\gamma} = L_{r\gamma} \cdot i_{r\gamma} - \frac{1}{2} \cdot L_m \cdot (i_{r\beta} + i_{r\alpha}) + L_m \cdot \left(i_{s\gamma} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\beta} - \frac{1}{2} \cdot i_{s\alpha} \right), \quad (3.13)$$

де $U_{s\alpha}, U_{s\beta}, U_{s\gamma}, U_{r\alpha}, U_{r\beta}, U_{r\gamma}, i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{s\gamma}$ - напруга та струм по трьох осях; $r_{s\alpha}, r_{s\beta}, r_{s\gamma}, r_{r\alpha}, r_{r\beta}, r_{r\gamma}$ - активні опори статора та ротора; $L_{s\alpha}, L_{s\beta}, L_{s\gamma}, L_{r\alpha}, L_{r\beta}, L_{r\gamma}$ - повні індуктивності обмоток статора та ротора; L_m - взаємна індуктивність статора та ротора; $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, \psi_{s\gamma}, \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}, \psi_{r\gamma}$ - потокозчеплення ротора та статора по осям, отримані під час розрахунку; ω_r - частота обертання ротора.

Електромагнітний момент, який генерується машиною, можна виразити наступним чином:

$$M_e = p \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot L_m \cdot \left[(i_{s\alpha} \cdot i_{r\gamma} + i_{s\beta} \cdot i_{r\alpha} + i_{r\beta} \cdot i_{s\gamma}) - (i_{s\alpha} \cdot i_{r\beta} + i_{s\beta} \cdot i_{r\gamma} + i_{r\alpha} \cdot i_{s\gamma}) \right] \quad (3.14)$$

Основним рівнянням руху електропривода описуємо механічні процеси асинхронного двигуна:

$$M_e - M_c = J \cdot \frac{d\omega_r}{dt}. \quad (3.15)$$

Наведений математичний опис асинхронного двигуна найповніше відображає процеси, що протікають в асинхронному двигуні. Однак застосування трифазної моделі асинхронного двигуна можливе за умови наявності несиметрії в колах статора і ротора, аварійних режимах роботи асинхронного двигуна, а також детальному дослідженні процесів, що відбуваються в асинхронному двигуні [25].

Оскільки кожен шнек системи дозування працює в умовах номінального режиму свого електродвигуна, замість трифазної моделі асинхронного двигуна можна використовувати спрощену двофазну математичну модель. При проектуванні імітаційної моделі асинхронного двигуна застосуємо загальноприйняті припущення:

- втрати в сталі та насичення магнітного кола асинхронного двигуна не враховуються;

- напруги на вході перетворювача частоти приймаємо тільки синусоїдальної форми;
- розглядаємо трифазний симетричний режим роботи;
- не приймаємо до уваги вплив силового каналу, який утворюється між асинхронним двигуном та перетворювачем частоти.

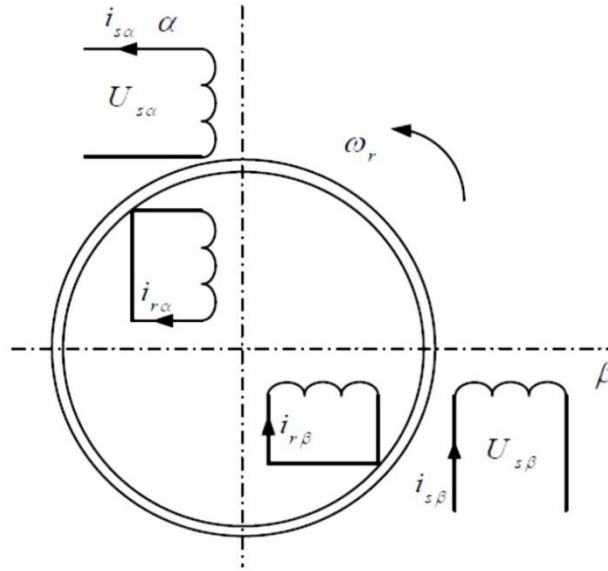


Рисунок 3.2 – Ідеальна модель двофазного асинхронного двигуна

Ідеалізована модель двофазного асинхронного двигуна зображена на рисунку 3.2, відносно якої розглянемо процеси, які описують її, при цьому використовуючи систему векторних диференціальних рівнянь [17]:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_s = R_s \cdot I_s + \frac{d\psi_s}{dt}; \\ U_r = R_r \cdot I_r + \frac{d\psi_r}{dt}; \\ \psi_s = L_s \cdot I_s + L_m \cdot I_r; \\ \psi_r = L_r \cdot I_r + L_m \cdot I_s; \\ M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (\vec{\psi}_s \times \vec{I}_r); \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M - M_c), \end{array} \right. \quad (3.15)$$

де $U_s, U_r, I_s, I_r, \psi_s, \psi_r$ - двоелементні вектори напруги та струму, потокозчеплення, які представлені в двофазній системі координат у вигляді складових по осях координат; J - момент інерції; ω_r - частота обертання ротора; z_r - число пар полюсів асинхронного двигуна; M - електромагнітний момент; M_c - момент опору навантаження.

Вектори стану асинхронного двигуна у двофазній системі координат виглядають наступним чином:

$$\begin{aligned} U_s &= \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix}, & U_r &= \begin{bmatrix} u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix}, \\ I_s &= \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}, & I_r &= \begin{bmatrix} i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix}, \\ \psi_s &= \begin{bmatrix} \psi_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \end{bmatrix}, & \psi_r &= \begin{bmatrix} \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix}, \\ j &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Компонентами вектору в нерухомій системі координат обираємо індекси α та β відповідно.

Трифазна асинхронна машина в дійсності має вигляд двофазної моделі, і у зв'язку з цим перехід між складовими векторів в двофазних координатах та трифазній координатній системі здійснюється за допомогою формули перетворення Кларк (Clarke Transformation) [23].

І вищезгаданий перехід розглянемо на прикладі перетворення вектору струму статора I_s (рис. 3.3), для всіх інших змінних перетворення буде ідентичним.

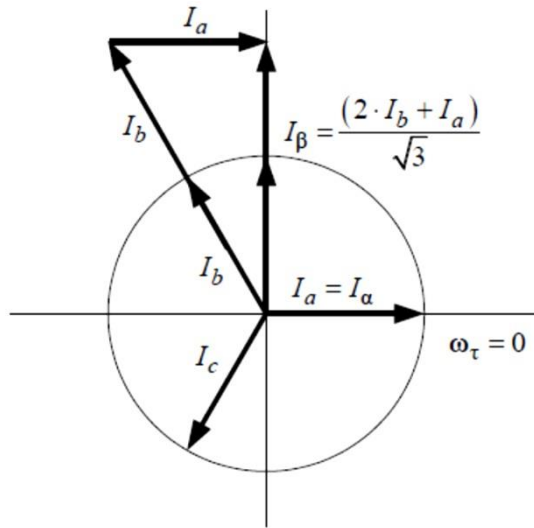


Рисунок 3.3 - Перетворення вектору струму статора за допомогою формули Кларк (Clarke Transformation)

$$i_{sa} = i_{sa}, \quad i_{s\beta} = \frac{(2 \cdot i_{sb} + i_{sa})}{\sqrt{3}}, \quad (3.17)$$

де i_{sa}, i_{sb} - складові вектору струму статора I_s , які наведені в двофазній нерухомій системі координат; i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} - фазні струми статора асинхронного двигуна, які знаходяться в симетричній трифазній системі.

Система рівнянь (3.15) дає велику кількість невідомих, і для того, щоб зменшити їх, необхідно виконати наступну підстановку, метою якої є виключення з системи рівнянь змінні ψ_s і I_r , залишивши ψ_r і I_s . Вирішуємо це рахунок вираження I_r з третього і четвертого рівнянь системи (3.15):

$$I_r = \frac{\psi_s - L_s \cdot I_s}{L_m}, \quad I_r = \frac{\psi_r - L_m \cdot I_s}{L_r}. \quad (3.18)$$

Прирівнявши обидві частини рівнянь, отримуємо:

$$\psi_s - L_s \cdot I_s = \frac{L_m}{L_r} \cdot (\psi_r - L_m \cdot I_s), \quad (3.19)$$

Після чого виділяємо ψ_s :

$$\psi_s = \frac{L_m}{L_r} \cdot \psi_r + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot I_s. \quad (3.20)$$

В перше рівняння системи (3.15) підставляємо вираз для ψ_s , отриманий із рівняння (3.20)

$$U_s = R_s \cdot I_s + \frac{d\psi_s}{dt} = R_s \cdot I_s + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_r}{dt} + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{dI_s}{dt}. \quad (3.21)$$

У друге рівняння системи (3.15) підставляємо I_r :

$$\begin{aligned} U_r &= R_r \cdot I_r + \frac{d\psi_r}{dt} - j \cdot \omega_r \cdot z_p \cdot \psi_r = R_r \cdot \left(\frac{\psi_r - L_m \cdot I_s}{L_r} \right) + \frac{d\psi_r}{dt} - j \cdot \omega_r \cdot z_p \cdot \psi_r = \\ &= \frac{d\psi_r}{dt} - j \cdot \omega_r \cdot z_p \cdot \psi_r + R_r \cdot \frac{\psi_r}{L_r} - R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot I_s = \frac{d\psi_r}{dt} - \left(j \cdot \omega_r \cdot z_p + \frac{R_r}{L_r} \right) \cdot \psi_r - \\ &- R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot I_s \end{aligned} \quad (3.22)$$

З рівняння (3.15) отримуємо вираз для $\frac{d\psi_r}{dt}$ та робимо його підстановку в рівняння (3.21):

$$\begin{aligned} U_s &= R_s \cdot I_s + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_r}{dt} + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{dI_s}{dt} = R_s \cdot I_s + \frac{L_m}{L_r} \cdot U_r + \frac{L_m}{L_r} \cdot \left(j \cdot \omega_r \cdot z_p + \frac{R_r}{L_r} \right) \cdot \psi_r + \\ &+ R_r \cdot \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \cdot I_s + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{dI_s}{dt} \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$U_s - \frac{L_m}{L_r} \cdot U_r = \left[R_s + R_r \cdot \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \right] \cdot I_s + \frac{L_m}{L_r} \cdot \left(j \cdot \omega_r \cdot z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \cdot \psi_r + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{dI_s}{dt}. \quad (3.24)$$

Значення $U_r=0$ для асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Рівняння для електромагнітного моменту перепишемо з використанням рівняння (3.20):

$$\begin{cases} U_s = \left[R_s + R_r \cdot \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \right] \cdot I_s + \frac{L_m}{L_r} \cdot \left(j \cdot \omega_r \cdot z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \cdot \psi_r + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{dI_s}{dt}, \\ 0 = \frac{d\psi_r}{dt} - \left(j \cdot \omega_r \cdot z_p + \frac{R_r}{L_r} \right) \cdot \psi_r - R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot I_s, \\ M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{L_r} (\psi_s \times I_s), \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M - M_c). \end{cases} \quad (3.25)$$

Щоб спростити запис системи рівнянь, вводимо додаткові коефіцієнти і переходимо до операторної форми [17].

$$\begin{cases} U_s = R_e \cdot I_s + K_r \cdot j \cdot \omega_r \cdot z_p \cdot \psi_r - K_r \cdot A_r \cdot \psi_r + L_e \cdot p \cdot I_s, \\ 0 = p \cdot \psi_r - j \cdot \omega_r \cdot z_p \cdot \psi_r + A_r \cdot \psi_r - R_r \cdot K_r \cdot I_s, \\ M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot K_r (\psi_s \times I_s), \\ p \cdot \omega_r = \frac{1}{J} \cdot (M - M_c), \end{cases} \quad (3.26)$$

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

Систему рівнянь (3.24) змінюємо, визначивши похідні вектору струму і потокозчеплення:

$$\begin{cases} p \cdot I_s = \frac{1}{L_e} (U_s - R_e \cdot I_s - K_r \cdot j \cdot \omega_r \cdot z_p \cdot \psi_r + K_r \cdot A_r \cdot \psi_r), \\ p \cdot \psi_r = R_r \cdot K_r \cdot I_s - A_r \cdot \psi_r + j \cdot \omega_r \cdot z_p \cdot \psi_r, \\ M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot K_r (\psi_s \times I_s), \\ p \cdot \omega_r = \frac{1}{J} \cdot (M - M_c). \end{cases} \quad (3.27)$$

Далі систему векторних рівнянь (3.27) потрібно перевести в скалярну форму, підставивши складові векторів ψ_r та I_s за відповідними координатами. Векторний добуток у виразі для електромагнітного моменту розкриваємо згідно з правилами векторної алгебри. З урахуванням (3.16) отримуємо нову систему скалярних рівнянь, яка виглядає так:

$$\begin{cases} p \cdot i_{s\alpha} = \frac{1}{L_e} (u_{s\alpha} - R_e \cdot i_{s\alpha} - K_r \cdot j \cdot \omega_r \cdot z_p \cdot \psi_{r\beta} + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{r\alpha}), \\ p \cdot i_{s\beta} = \frac{1}{L_e} (u_{s\beta} - R_e \cdot i_{s\beta} - K_r \cdot j \cdot \omega_r \cdot z_p \cdot \psi_{r\alpha} + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{r\beta}), \\ p \cdot \psi_{r\alpha} = R_r \cdot K_r \cdot i_{s\alpha} - A_r \cdot \psi_{r\alpha} + j \cdot \omega_r \cdot z_p \cdot \psi_{r\beta}, \\ p \cdot \psi_{r\beta} = R_r \cdot K_r \cdot i_{s\beta} - A_r \cdot \psi_{r\beta} + j \cdot \omega_r \cdot z_p \cdot \psi_{r\alpha}, \\ M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot K_r (\psi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}), \\ p \cdot \omega_r = \frac{1}{J} \cdot (M - M_c). \end{cases} \quad (3.28)$$

Цю систему диференціальних рівнянь в операційному вигляді (3.28) можна подати у вигляді структурної моделі. Отримана структурна схема

зображена на рисунку 3.5, на основі якої була розроблена імітаційна модель у програмі Matlab Simulink [24,25].

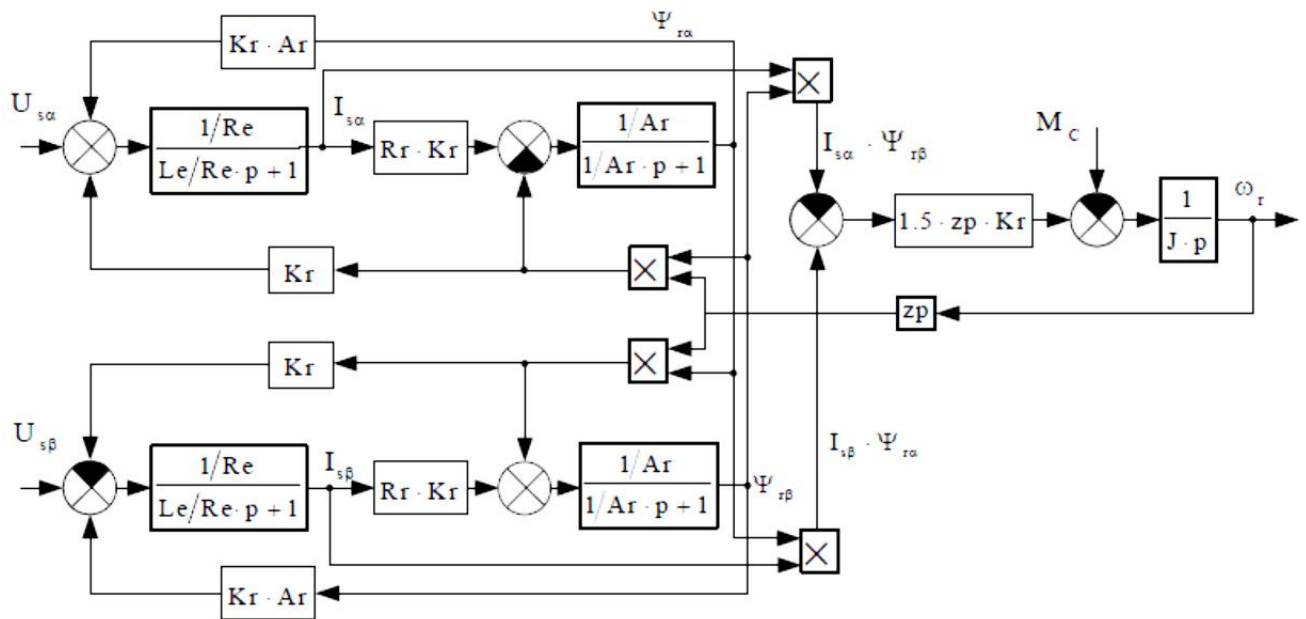


Рисунок 3.5 – Структурна схема імітаційної моделі асинхронного двигуна

Асинхронні двигуни, що застосовуються в системі дозування сипучих речовин, зокрема в процесі приготування комбікорму, керуються перетворювачем частоти з ланкою постійного струму. З огляду на економічну ефективність і необхідність повної автоматизації технологічного процесу дозування компонентів комбікорму, керувати асинхронними двигунами шнекових дозаторів доцільно через єдиний перетворювач частоти. Цей перетворювач налаштований на роботу з шістьма виконавчими асинхронними двигунами шнекових дозаторів, що мають різну продуктивність і потужність. Підключення кожного двигуна до перетворювача частоти здійснюється послідовно за допомогою блоку релейної комутації відповідно до алгоритму роботи системи дозування.

Відмінність двигунів шнекових дозаторів полягає в потужності та параметрах схеми заміщення. Це ускладнює використання частотного перетворювача з векторним керуванням, тому для керування дозуванням застосовується перетворювач частоти зі скалярним керуванням.



II. RESULT: COMMON INTERESTS IN THE OTHER PARTY'S WASTES (ART. 2.7)

$$\sqrt{2} \mathbf{H}_1 = (\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_2 - \mathbf{e}_3, \dots, \mathbf{e}_{n-1} - \mathbf{e}_n); \quad (2.20)$$

$$\sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma^2} + \frac{1}{\sigma^2} \right)} = \frac{1}{\sigma} \quad (2.38)$$

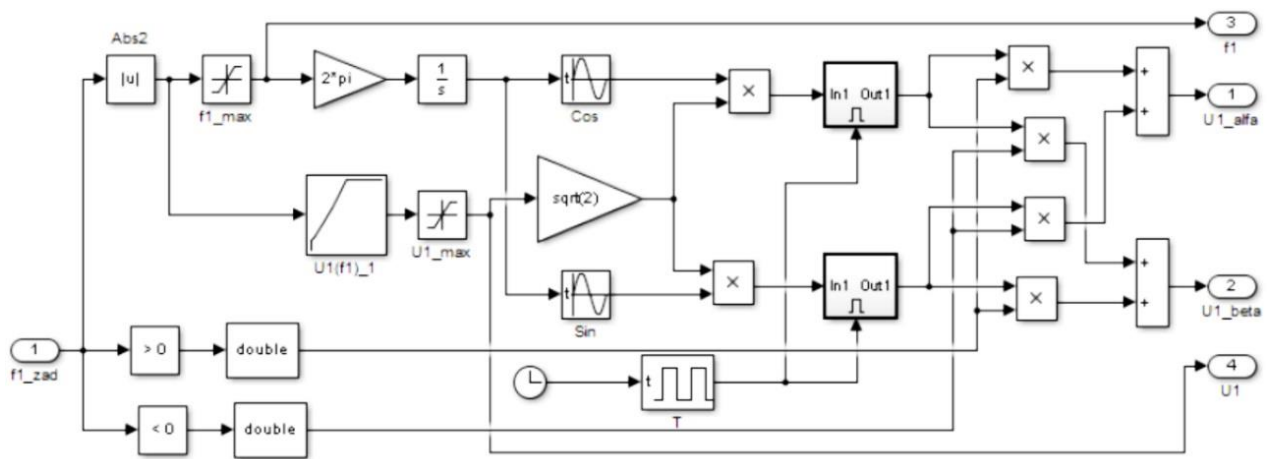


Рисунок 3.7 – Імітаційна модель перетворювача частоти зі скалярним керуванням

У стаціонарній системі координат сигнали напруги, що надходять на вхід електродвигуна, попередньо квантуються за часом з фіксованим кроком. Цей сталий період квантування відповідає частоті широтно-імпульсної модуляції.

3.2 Математична модель падаючого стовпа сипучих речовин

Падаючий стовп містить масу дозованої речовини, яка суттєво впливає на підсумкову похибку дозування. Для зменшення цього впливу необхідно визначити масу падаючого стовпа і провести коригування величини завдання.

Щоб розрахувати масу падаючого стовпа, потрібно знати насипну щільність речовини, а також його діаметр і висоту в стовпі. Насипна щільність визначається як відношення маси продукту до його об'єму у насипному стані. Найпоширеніші табличні значення насипної щільності для різних речовин наведена у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Фізико-механічні властивості сипучих речовин

Найменування	Розміри			Щільність, кг/м ³	Насипна щільність, кг/м ³	Коефіцієнт внутрішнього тертя	Коефіцієнт зовнішнього тертя			Швид- кість витання, м/с
	довжина, мм	ширина, мм	товщина, мм				по сталі	по дереву	по бето- ну	
Пшениця	4,8 - 8,0	1,6 - 4,0	1,5 - 3,0	1200-1500	700-750	0,47	0,37	0,4	0,4	9,8
Просо	1,8 - 3,8	1,5 - 2,0	1,5 - 1,7	1100-1200	730	0,52	0,34	0,4	0,34	8,3
Кукурудза	5,5 - 13,5	5,5- 11,5	2,5 - 8,0	1350	730	0,53	0,37	0,35	0,42	11,5
Ячмінь	7,0 – 14,6	2,0 - 5,0	1,5 - 3,0	1200-1400	650	0,51	0,37	0,4	0,43	9,0
Висівки	-	-	-	-	170-500	1,2-1,6	0,6-2,2	0,9-1,1	-	2,5-3,5
Лущиння соняшника	-	-	-	-	210-300	1,2-1,5	0,4-0,9	1,0-2,2	-	4-5
Комбікорм	-	-	-	1100-1600	350-570	0,5-0,8	0,5-0,8	0,6-1,0	-	7,0-8,7
Борошно в/г, 1-й сорт, 2-й сорт	не більше ніж 0,16 0,16 – 0,20 0,18– 0,8			1400	550-680	1,2-1,8	0,6-1,0	0,5-0,6	-	2-4

Зважаючи на геометричні параметри бункера, відстань від шнека до бункера та щільність матеріалу, можна розрахувати висоту падаючого стовпа, застосовуючи наступну формулу для бункера кубічної форми:

$$h = c = \frac{V}{a \cdot b} \quad (3.31)$$

Маса матеріалу в бункері розраховується за формулою:

$$m = \gamma \cdot V \quad (3.32)$$

Знаходимо повний обсяг бункера:

$$V = a \cdot b \cdot h_m, \quad (3.33)$$

де h_m - висота в бункері, який заповнений речовиною.

Маса дозованого матеріалу є технологічним параметром, який визначається за допомогою трьох тензодатчиків та підсумовується в нормований струмовий сигнал стандартного формату, що подається на вхід програмно реалізованого регулятора ваги в системі керування.

Знаходимо висоту в бункері, який заповнений речовиною, виконавши підстановку рівняння (3.33) в (3.32):

$$h_m = \frac{m}{\gamma \cdot a \cdot b} \quad (3.34)$$

У процесі дозування припускаємо рівномірний розподіл матеріалу по площі приймального бункера, ігноруючи утворення конусного насипу. Площа поперечного перерізу падаючого стовпа розраховується з урахуванням геометричних розмірів лопаті шнека. При цьому припускаємо, що ця площа дорівнює площі робочої поверхні останнього витка шнека.

Виток шнека має зовнішній і внутрішній діаметр, відповідно, площу розраховуємо згідно до формули:

$$S_{cm} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_0^2 - d_0^2), \quad (3.35)$$

де D_0 - зовнішній діаметр шнека, d_0 - внутрішній діаметр шнека.

Використовуючи дані таблиці 3.1 визначаємо насипну щільність конкретної дозуючої речовини та знаходимо масу падаючого стовпа, яка

дозволить в реальному часі відслідковувати зміну маси речовини, що знаходиться в повітрі:

$$m_{cm} = S_{cm} \cdot h_{cm} \cdot \gamma \quad (3.36)$$

На рисунку 3.8 представлено імітаційну модель шнекового дозатора, яка враховує змінну тимчасову затримку та обчислення маси падаючого стовпа. Однією з головних особливостей цієї моделі є те, що вона враховує масу «падаючого стовпа» та тимчасову затримку, які динамічно змінюються в процесі накопичення матеріалу з різними властивостями у бункері.

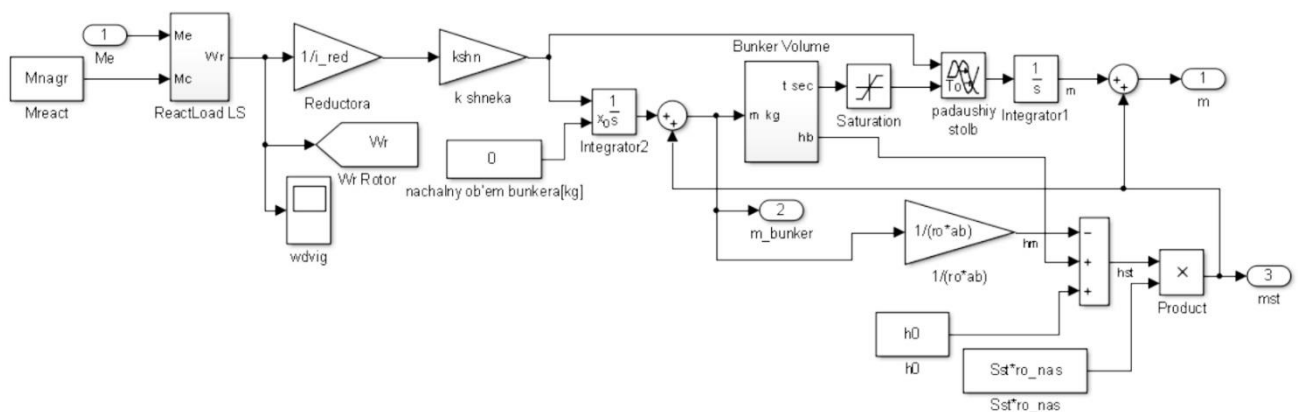


Рисунок 3.8 - Імітаційна модель шнекового дозатора, яка враховує змінну тимчасову затримку та обчислення маси падаючого стовпа

3.3 Імітаційна модель системи дозування сипучих речовин

В створеній моделі системи дозування сипучих речовин використовуємо релейний регулятор ваги, який формує завдання, в тому випадку коли вага в бункері менше заданої величини, і вимикається якщо вагу перевищено. В моделі, наведеній на рисунку 3.9, застосовуються субблоки асинхронного двигуна та механічної системи, які розглядалися раніше, а також блок, який моделює керування перетворювачем частоти.

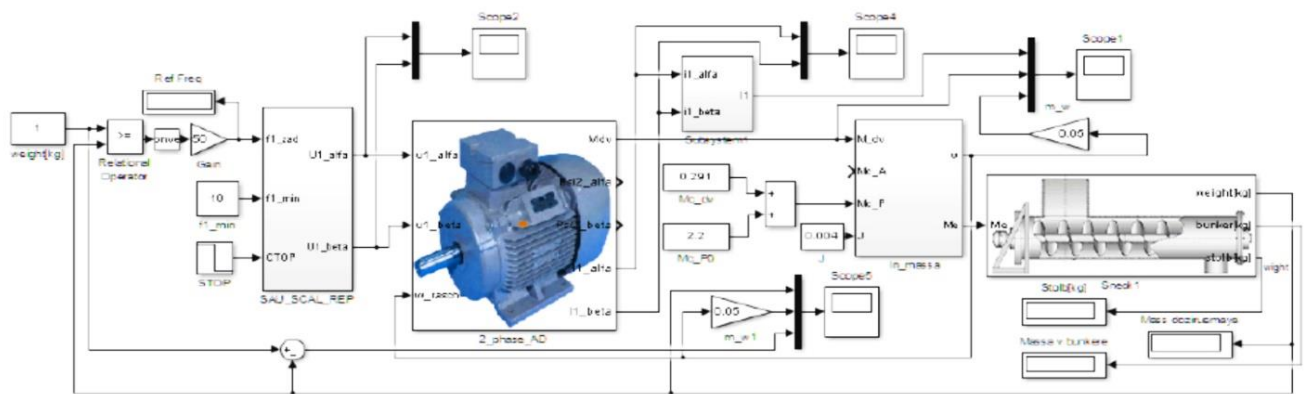


Рисунок 3.9 – Модель системи дозування сипучих речовин з релейним регулятором ваги

Результати дозування одного кілограму речовини, отримані за допомогою імітаційної моделі та експериментальної установки за повністю ідентичних умов, наведені на рисунку 3.10. Аналіз даних дозволяє зробити висновок, що математична модель дозування сипких матеріалів демонструє достатню адекватність, що підтверджується її відповідністю фізичному процесу.

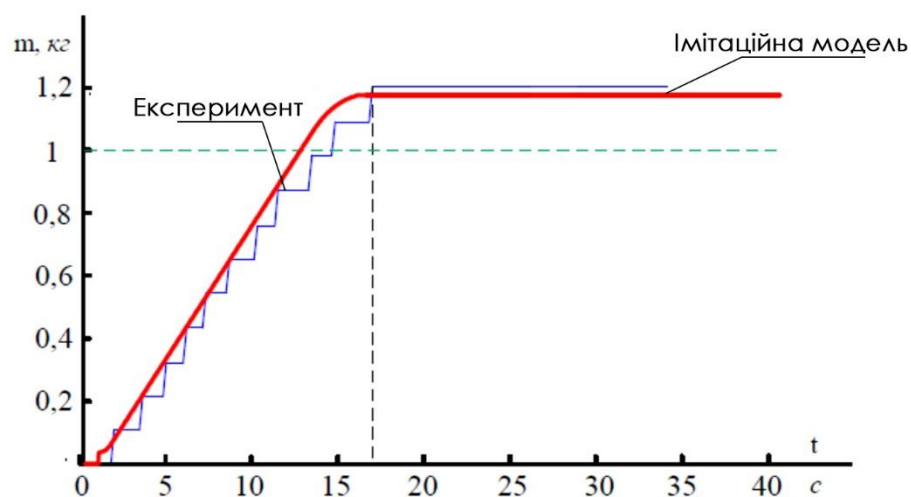


Рисунок 3.10 – Порівняльний графік результатів дозування сипучих речовин

Поряд з тим, спостерігається значна абсолютна похибка дозування, яка становить 18,67%. Така величина є неприйнятною відповідно до технологічних вимог для приготування комбікорму, де допустима похибка дозування

становить $\pm 3\%$. Для досягнення необхідної точності в системі керування частотним асинхронним електроприводом потрібно впровадити спеціальні алгоритми корекції похибок дозування.

На точність процесу дозування сипучих речовин значно впливають такі фактори, як кут нахилу шнекового дозатора відносно лінії горизонту, фізико-механічні властивості речовини, коефіцієнт заповнення корпусу шнека тощо.

За допомогою розробленої моделі автоматичної системи дозування сипучих речовин проведено дослідження впливу різних факторів на точність і продуктивність системи дозування.

На рисунку 3.11 зображено перехідні процеси дозування гранул поліпропілену, в яких кут нахилу шнекового дозатора до лінії горизонту 0° , 15° і 30° .

На графіку суцільна лінія - дозування поліпропілену за умови ідеального розташування шнекового дозатора до лінії горизонту, штрихована лінія відображає дозування при нахилі 15° до горизонту, а точкова — дозування при нахилі 30° шнекового дозатора.

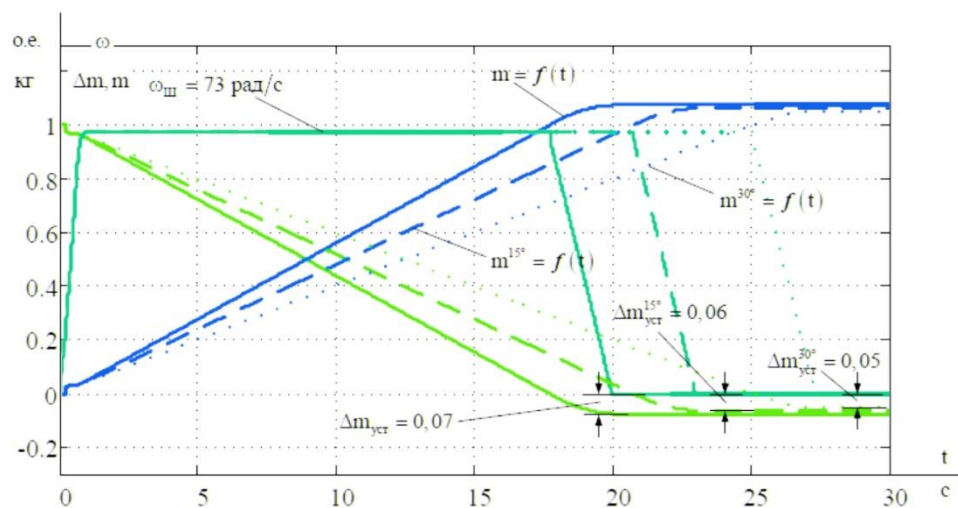


Рисунок 3.11 – Графік результатів дозування поліпропілену при різних кутах нахилу шнекового дозатора до лінії горизонту з урахуванням перехідних процесів

З результатів моделювання видно, що при нахилі шнека до лінії горизонту на 30° похибка дозування майже не змінюється, однак продуктивність дозування зменшується на 26%. Одним із ключових завдань цієї роботи є досягнення максимальної якості суміші, й одночасне забезпечення найвищої продуктивності її приготування. Згідно з формулою (3.37), максимальна продуктивність дозування досягається коли кут нахилу шнека α дорівнює 0° .

$$Q = \frac{60 \cdot \pi \cdot D^2}{4} \cdot S \cdot n \cdot c \cdot \gamma \cdot \psi, \quad (3.37)$$

де D - зовнішній діаметр шнека, м; S – крок гвинта шнека, м; n – кутова швидкість обертання валу, об/хв; c – коефіцієнт, який враховує вплив кута нахилу осі шнека до лінії горизонту на його продуктивність; γ - насипна щільність речовини, кг/м^3 ; ψ - коефіцієнт наповнення корпусу шнека.

Синтез керування із застосуванням спеціальних алгоритмів коригування похибка дозування проводиться за умови горизонтального положення шнекового дозатора. Далі буде проаналізовано вплив фізико-механічних властивостей матеріалу на якість дозування. На рисунках 3.12 та 3.13 наведені перехідні процеси дозування пшениці та кукурудзи за різних кутів нахилу шнека.

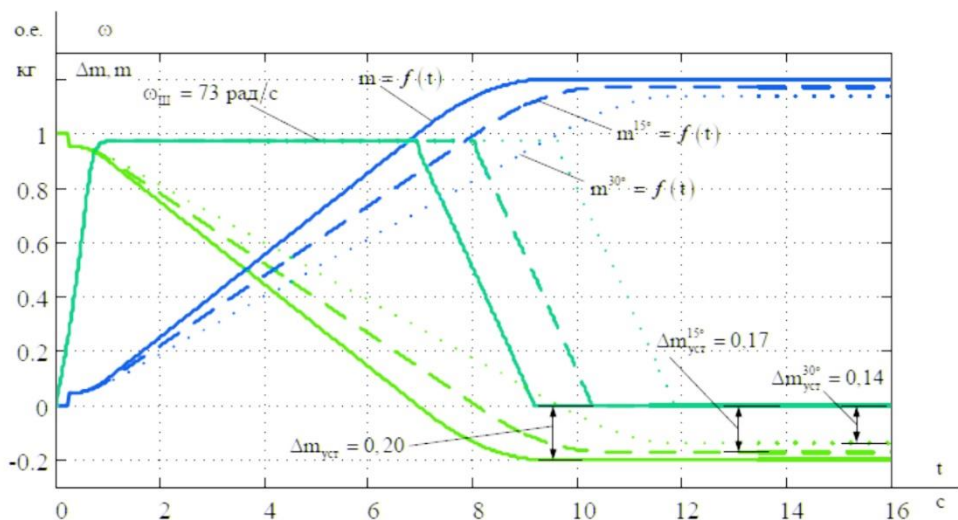


Рисунок 3.12 - Графік результатів дозування пшениці при різних кутах нахилу шнекового дозатора до лінії горизонту з урахуванням перехідних процесів

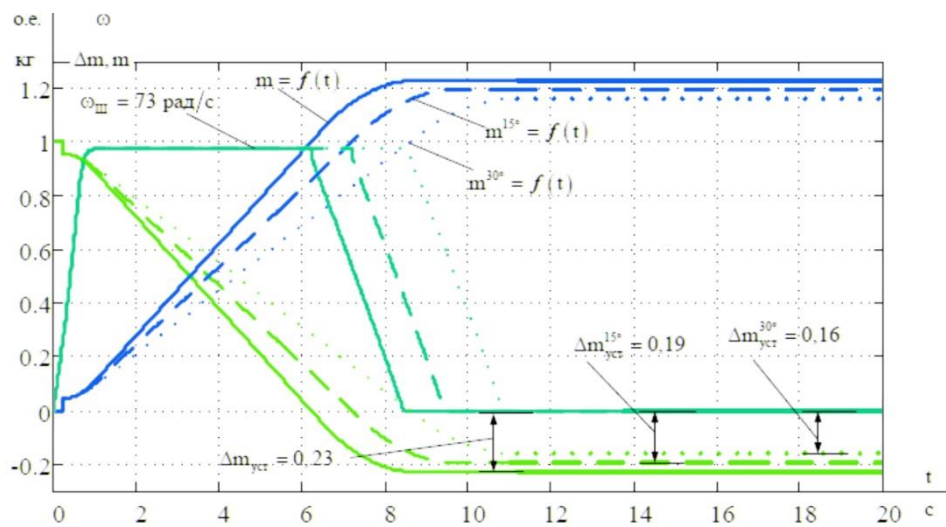


Рисунок 3.13 - Графік результатів дозування кукурудзи при різних кутах нахилу шнекового дозатора до лінії горизонту з урахуванням перехідних процесів

Після проведення всіх дослідів, можна припустити, що продуктивність шнекового дозатора стає більшою на 185%, коли збільшується насипна об'ємна маса речовини на 60%, це обумовлено тим, що в моделі збільшений коефіцієнт передачі шнекового дозатора, але також збільшується майже втричі відносна похибка дозування. Відповідно до вищезазначеного, робимо висновок - процес дозування супроводжується значною похибкою, і для її вирішення необхідно застосовувати спеціальні алгоритми корекції похибки.

4 Синтез керування асинхронним електроприводом в системі дозування сипучих речовин

Розв'язання задачі оптимального дозування сипучих речовин за критеріями точності та максимальної продуктивності багатокомпонентних сумішей пов'язане насамперед із розробкою алгоритму керування електроприводом шнекового дозатора. Такий алгоритм забезпечить необхідну точність дозування та оптимізує тривалість цього процесу.

Для синтезу алгоритму дозування використовується теорія цифрових регуляторів. Цей метод обрано через провідну роль цифрових систем керування в галузі автоматизування систем керування технологічними процесами. Крім того, застосування цього підходу дає змогу створити систему керування, яка ефективно використовує ресурси обраного процесора.

Останнім часом, звертаючи увагу на специфікацію електроприладів, а саме: різноманітність навантажувальних характеристик, режими і умови роботи (якість електроенергії, навколишнє середовище), в сільськогосподарському виробництві найбільш поширеними є асинхронні двигуни загального призначення потужністю від 0.75 до 7.5 кВт.

Приймаючи до уваги вимоги до точності дозування речовини та складу сумішей, в сільськогосподарському виробництві все більше впроваджуються системи “перетворювач частоти – асинхронний двигун” з широтно-імпульсною модуляцією, які забезпечують необхідну точність дозування і надійність системи.

За допомогою скалярного керування здійснюється керування приводного двигуна шнекового живильника, яке дозволяє для багатьох шнекових дозаторів використовувати загальний перетворювач частоти та нескладний у налаштуванні.

Враховуючи всі особливості технологічного процесу та принципи керування сформулюємо вимоги до електроприводу шнекового дозатора, представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Вимоги до електроприводу шнекового дозатора

Режим роботи	повторно-короткочасний;
Максимальна кутова швидкість	$\omega = 15.6 \text{ рад/с}$
Сигнал керування на вході електроприводу	цифро-аналоговий
Температура в приміщенні	від +5 до +30 °C

Відносна вологість в приміщенні	не більше 80% (при температурі +25 °С)
Місцезнаходження електропривода в приміщенні	шафа
Ступінь захисту електродвигуна від зовнішніх впливів	IP44

4.1 Методика розробки цифрового регулятора ваги в електромеханічній системі

Сучасні цифрові системи керування базуються на мікроконтролерах, де сигнали подаються у вигляді набору даних, дискретних за рівнем і часом. Однією з ключових переваг цифрових систем керування є можливість їхнього переналаштування шляхом редагування програми мікроконтролера.

Для обробки дискретних даних застосовують цифрові регулятори, які забезпечують вищу якість керування порівняно з аналоговими.

Процес синтезу регулятора слід розпочати з визначення структури об'єкта керування. Структурна схема слідкуючого електропривода з регулятором ваги наведена на рисунку 4.1, де $D(p)$ – передавальна функція регулятора ваги; ЕП – передавальна функція електроприводу; $G_p(p)$ – передавальна функція об'єкта керування; $F(p)$ – передавальна функція вимірювальної системи.

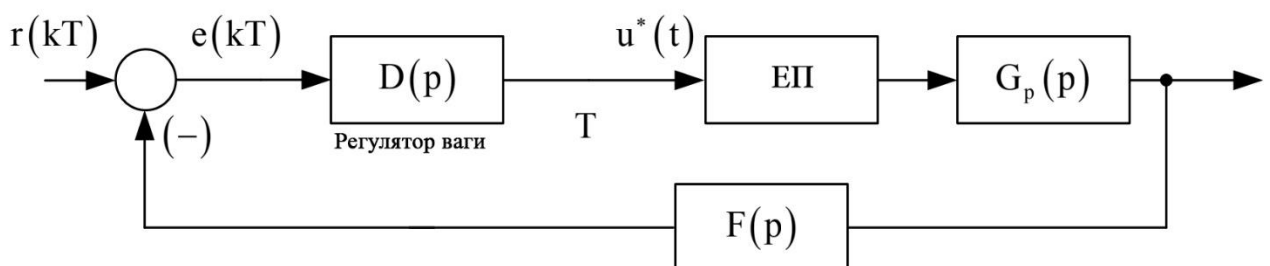


Рисунок 4.1 – Структурна схема слідкуючого електропривода з регулятором ваги

Використовуючи z-перетворення, переводимо всі безперервні передавальні функції в дискретну область, щоб застосувати синтез керування, і отримуємо структурну схему, наведену на рисунку 4.2.

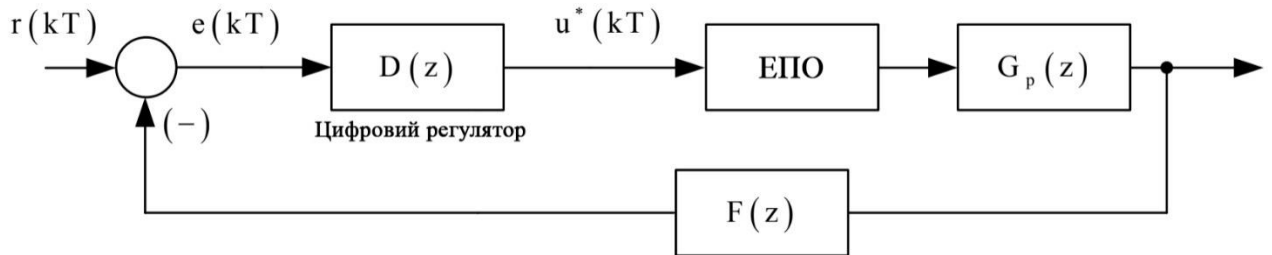


Рисунок 4.2 – Структурна схема цифрової системи керування в дискретному представленні

У вигляді аперіодичної ланки першого порядку для синтезу регулятора представимо модель асинхронного двигуна. Еквівалентну постійну часу знаходимо за формулою:

$$T_e = \frac{x_{1H} + x'_{2H}}{\omega_{0ел.ном} \cdot R_2} + J_e \quad (4.1)$$

На рисунку 4.4 наведено перехідний процес асинхронного двигуна та еквівалентної аперіодичної ланки.

Інтегруючою ланкою з коефіцієнтом передачі шнека представляємо перевальну функцію шнекового дозатору, відповідно структурна схема наведена на рисунку 4.3.

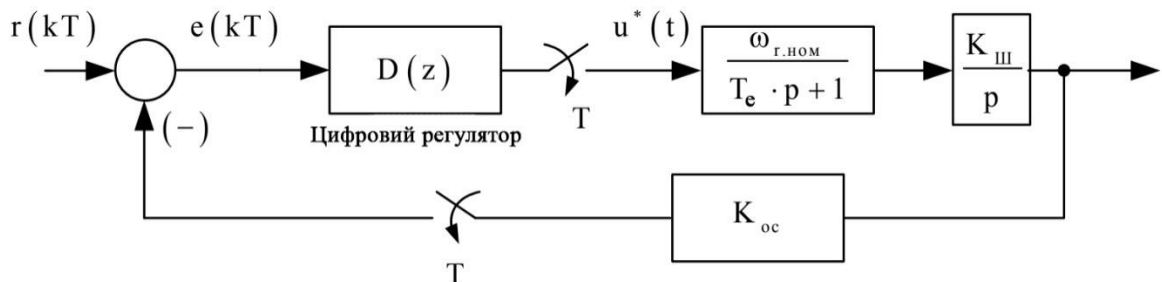


Рисунок 4.3 – Структурна схема системи керування та об'єкта регулювання

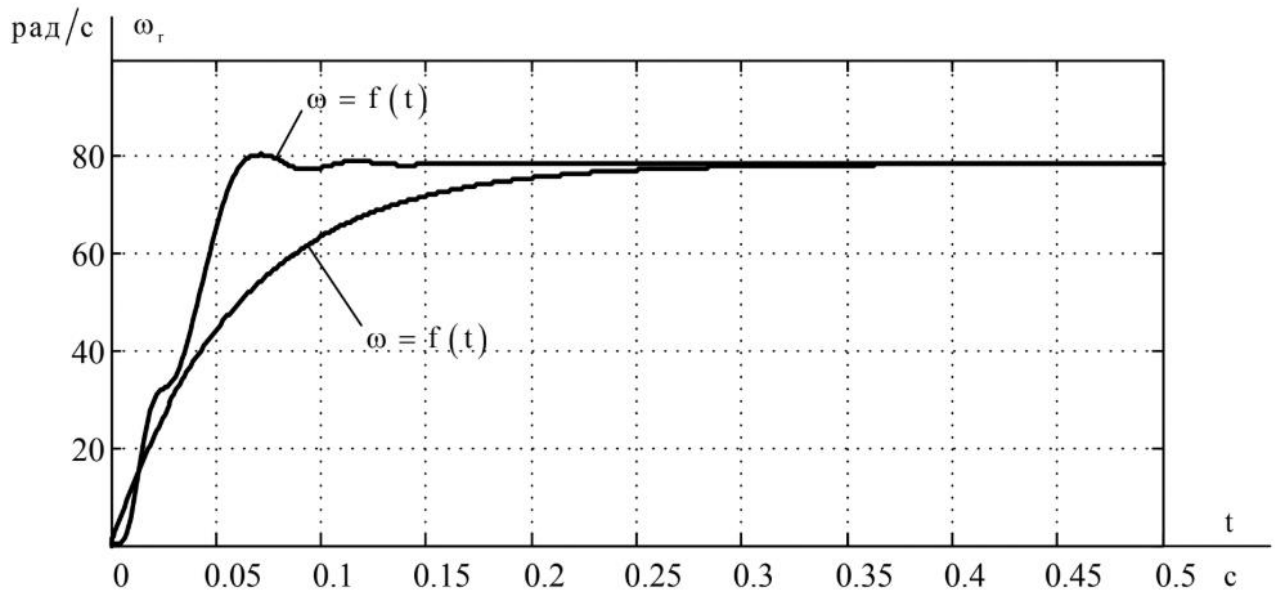


Рисунок 4.4 - Перехідний процес асинхронного двигуна та еквівалентної аперіодичної ланки

Значення постійної величини в дискретній області збігається зі значенням у безперервній області. У сформованому контурі присутні аперіодична ланка першого порядку та інтегруюча ланка, тому налаштування можна виконати за допомогою П-регулятора:

$$D(z) = k_{per} = \frac{1}{a \cdot T_e \cdot K_{ш} \cdot K_{OC}}, \quad (4.2)$$

де a - коефіцієнт настройки регулятора.

Щоб здійснити перехідний процес без регулювання (налаштування на лінійний оптимум) приймаємо $a = 4$.

Проаналізувавши дані, наведені на рисунку 4.5, робимо висновок, що перехідний процес дозування протікає без перерегулювання за проміжок часу, який дорівнює $3 \dots 4 T_e$.

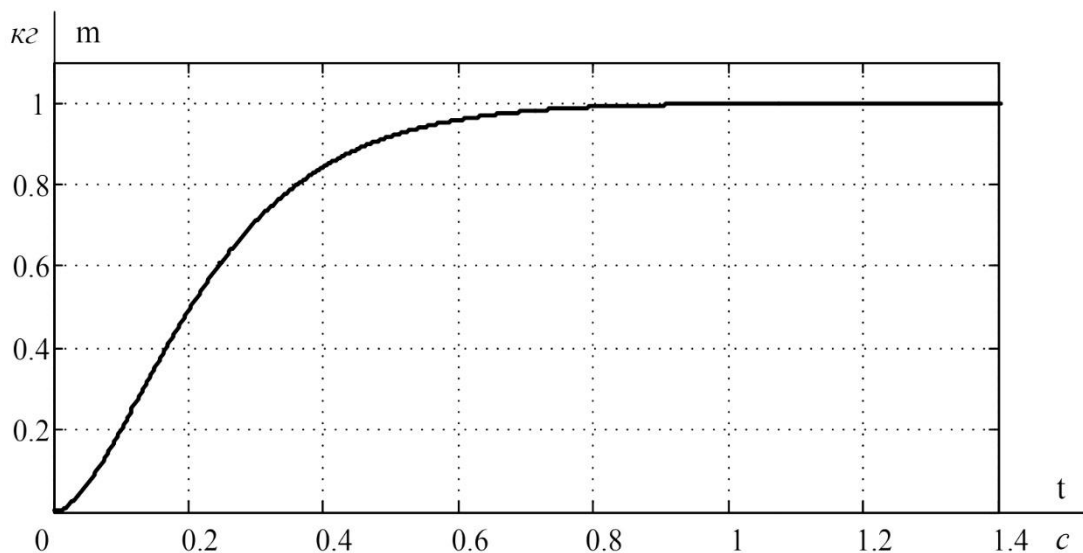


Рисунок 4.5 – Перехідний процес оптимізованої системи

Під час налаштування регулятора не враховувалася затримка часу, пов'язана з "падаючим стовпом" речовини в бункер, яка залежить від ступеня заповнення бункера. Для усунення помилок, що виникають під час дозування, необхідно застосувати додатковий адаптивний алгоритм.

4.2 Алгоритм асинхронного електропривода в технології виробництва комбікормів

До бази даних програмного забезпечення верхнього рівня вноситься інформація про якісний склад кожної порції комбікорму, який визначається технологами сільськогосподарського підприємства.

На рисунку 4.6 наведено алгоритм керування автоматизованою системою дозування сипучих матеріалів.

Початок роботи автоматизованої системи починається з вибору відповідного рецепта в системі SCADA на автоматизованому робочому місці оператора, а також порядку дозування компонентів всередині рецепта. До алгоритму керування автоматично потрапляє задане значення мінімальної частоти змінного струму перетворювача, яке забезпечує найменшу можливу

частоту обертання шнекового дозатора, разом з завданням на дозування компонента конкретного комбікорму.

Алгоритмічне забезпечення мікроконтролера керування за допомогою блока релейної комутації, забезпечує по чергово узгоджену апаратну роботу усіх шнекових дозаторів, засувок, змішувачів та розпушувачів.

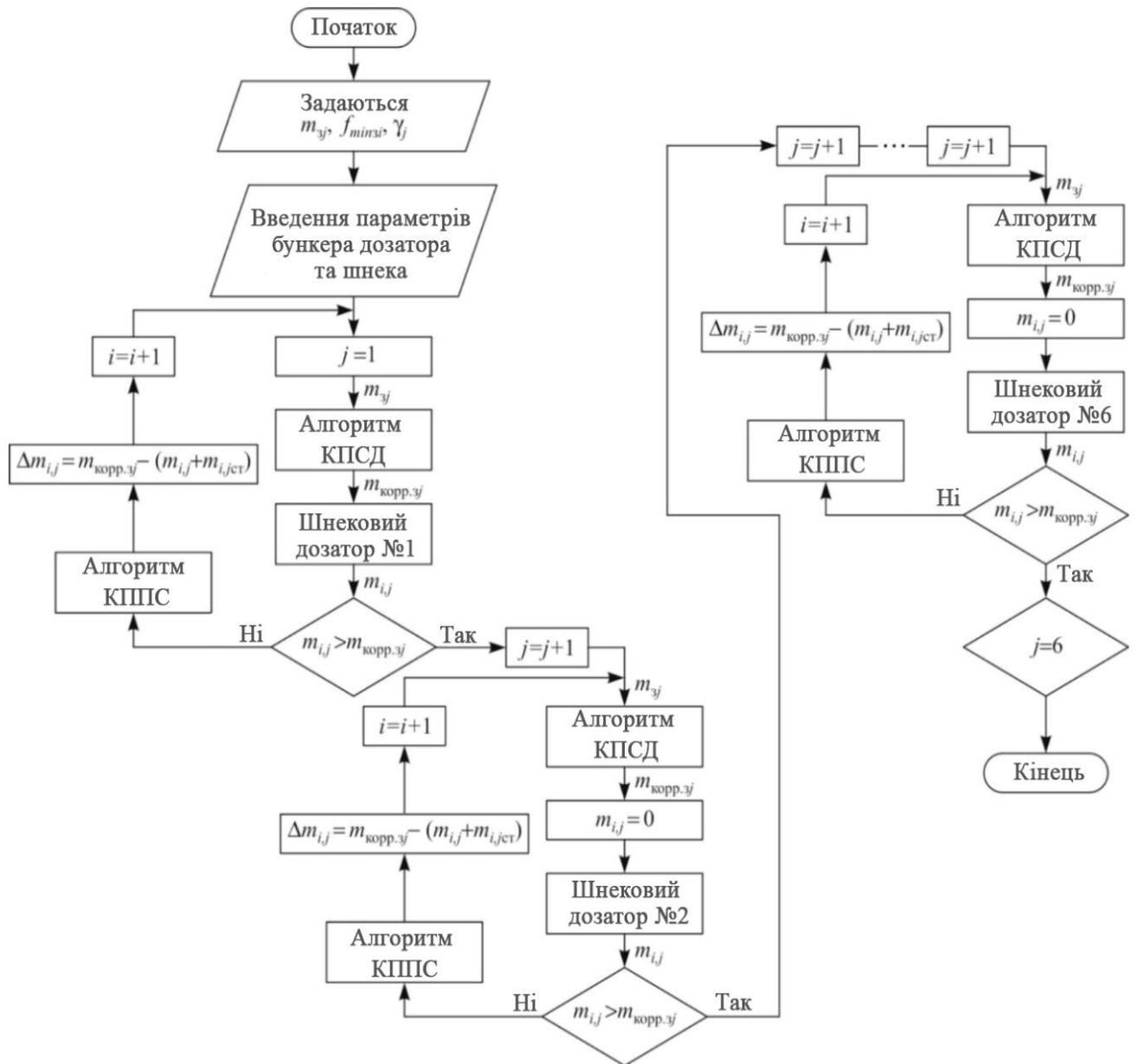


Рисунок 4.6 – Алгоритм керування асинхронним електроприводом виробництва комбікормів

Властивості дозуючої речовини є нестационарними, тому отримати дозування кожної порції компоненту суміші з однаковою точністю проблематично, і для вирішення даної проблеми потрібно коригувати відповідно до алгоритму корекції похибки дозування на основі статистичних даних, для коректної роботи якого в базі даних зберігається статистика роботи усіх шнекових дозаторів системи.

Сигнал, пропорційний поточній вазі речовини, потрапляє на вхід програмного регулятора ваги, який найбільше знаходиться в насиченні для отримання максимальної продуктивності. Коли вага наближується до заданого значення регулятор ваги виходить зі стану насиченості, і кінцева фаза дозування здійснюється на пониженій швидкості.

Безперервно в процесі роботи автоматичної системи вираховується величина маси речовини, який знаходиться у повітрі при падінні в бункер дозатора, за допомогою алгоритму корекції похибки дозування, отриманої масою падаючого стовпа. З урахуванням обчисленої величини маси падаючого стовпа похибка коригується за формулою:

$$\Delta m_1 = m_{корj} - (m_{i,j} + m_{i,jcc}), \quad (4.3)$$

де i - змінна циклу реального часу, j - номер поточного циклу.

Якщо $m_{i,j} > m_{корj}$, то вимикається шнековий дозатор першого циклу дозування і програма мікроконтролеру керування, за допомогою блоку релейної комутації, приєднує наступний шнековий дозатор до загального перетворювача частоти.

Кожен цикл дозування додає автоматично розрахований об'єм компонента суміші до загального бункера дозатора, який підвісили на трьох тензодатчиках, розрахованих на одну тонну суміші, але поточна вага кожного наступного циклу вираховується в реальному часі з нульового значення.

Порція комбікорму складається з 6 різних компонентів різної ваги. Загальна маса порції комбікормової суміші в бункері дозатора складає 1000 кг

та коли $j = 6$ проходить дозування останнього компонента рецепта комбікорму, після чого робота системи завершується.

Цикл приготування комбікорму завершується автоматично відкриттям засувки дозатора та перемішуванням технологічно обумовленим часом електроприводами змішувача та розпушувача.

Даний алгоритм автоматизованої системи дозування сипучих речовин в технології виробництва комбікормів відрізняється від інших, тим, що в ньому визначається послідовність дозування компонентів рецепта від найбільшого до найменшого значення – по тому, як заповнюється бункер-дозатор, висота та маса падаючого стовпа зменшуються; враховується маса «падаючого стовпа», що знаходиться в бункері речовини, яка має випадковий характер; забезпечується мінімізація помилки при зміні властивостей речовини, що переміщується.

4.3 Алгоритм функціонування завдання електропривода в системі дозування сипучих речовин

Точність, яка так потрібна в системах дозування, отримують за рахунок організації замкнутого контуру регулювання по вазі. Максимальна швидкодія досягається за рахунок того, що регулятор ваги більшу частину часу дозування знаходиться в стані насиченості. У зв'язку з тим, що компоненти, які дозуються, володіють нестационарними властивостями, що в свою чергу впливають на сипучість речовини, повторно отримати дозування речовини з заданою точністю проблемно. Застосування класичного підходу підпорядкованого регулювання на практиці в таких системах викликає помилки (перевага або недовага), які при масовому виробництві позначається на значних фінансових втратах. Для зменшення помилки керування в контур регулювання ваги включається алгоритм корекції помилки дозування на основі статистичних даних з урахуванням підтримки продуктивності шнекового живильника.

Розрахунок завдання на швидкість шнекового живильника в реальному часі при корекції регулятора ваги та мінімальної швидкості завдання працює в процесі дозування поточної порції речовини та мінімізує вплив зміни властивості матеріалу.

Поточна помилка дозування визначається за рівнянням:

$$\Delta m_{ij} = m_{zj} - m_{ij}, \quad (4.4)$$

де i - поточний цикл дозування; j - цикл розрахунку часу з кроком розрахунку 333 мс; m_{zj} - завдання на дозування для поточного циклу; m_{ij} - поточна маса дозуючої речовини.

Завдання на швидкість двигуна розраховується за формулою:

$$f_{zj} = k_{pei} \cdot \Delta m_{ij}, \quad (4.5)$$

де k_{pei} - коефіцієнт регулятора ваги для кожного кроку розрахунку.

При обмеженнях на частоту:

$$f_{zj} = f_{z\max}, \text{ якщо } f_{zj} > f_{z\max}, \quad (4.6)$$

$$f_{zj} = f_{z\min}, \text{ якщо } f_{zj} < f_{z\min}, \quad (4.7)$$

де $f_{z\max}$ та $f_{z\min}$ - розрахунки обмеження на частоту шнекового живильника.

Якщо перевищується час роботи збільшується мінімальна швидкість та коефіцієнт регулятора ваги.

$$f_{z\min j} = f_{z\min j-1} + \Delta f_{z\min 1}; \quad (4.8)$$

$$k_{pej} = k_{pei-1} + \Delta k_{pe1}. \quad (4.9)$$

Параметри $\Delta f_{z\min 1}$ та Δk_{pe1} визначаються експериментально.

Якщо йде довготривала робота на мінімальній швидкості, то вмикається таймер контролю мінімальної швидкості та суттєво збільшується мінімальна швидкість роботи шнекового живильника:

$$f_{z\min j} = f_{z\min j-1} + \Delta f_{z\min 2}; \quad (4.10)$$

$$\Delta f_{z\min 2} > f_{z\min 1}. \quad (4.11)$$

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

Блок-схема алгоритму коригування завдання частоти шнекового дозатора наведена на рисунку 4.7.

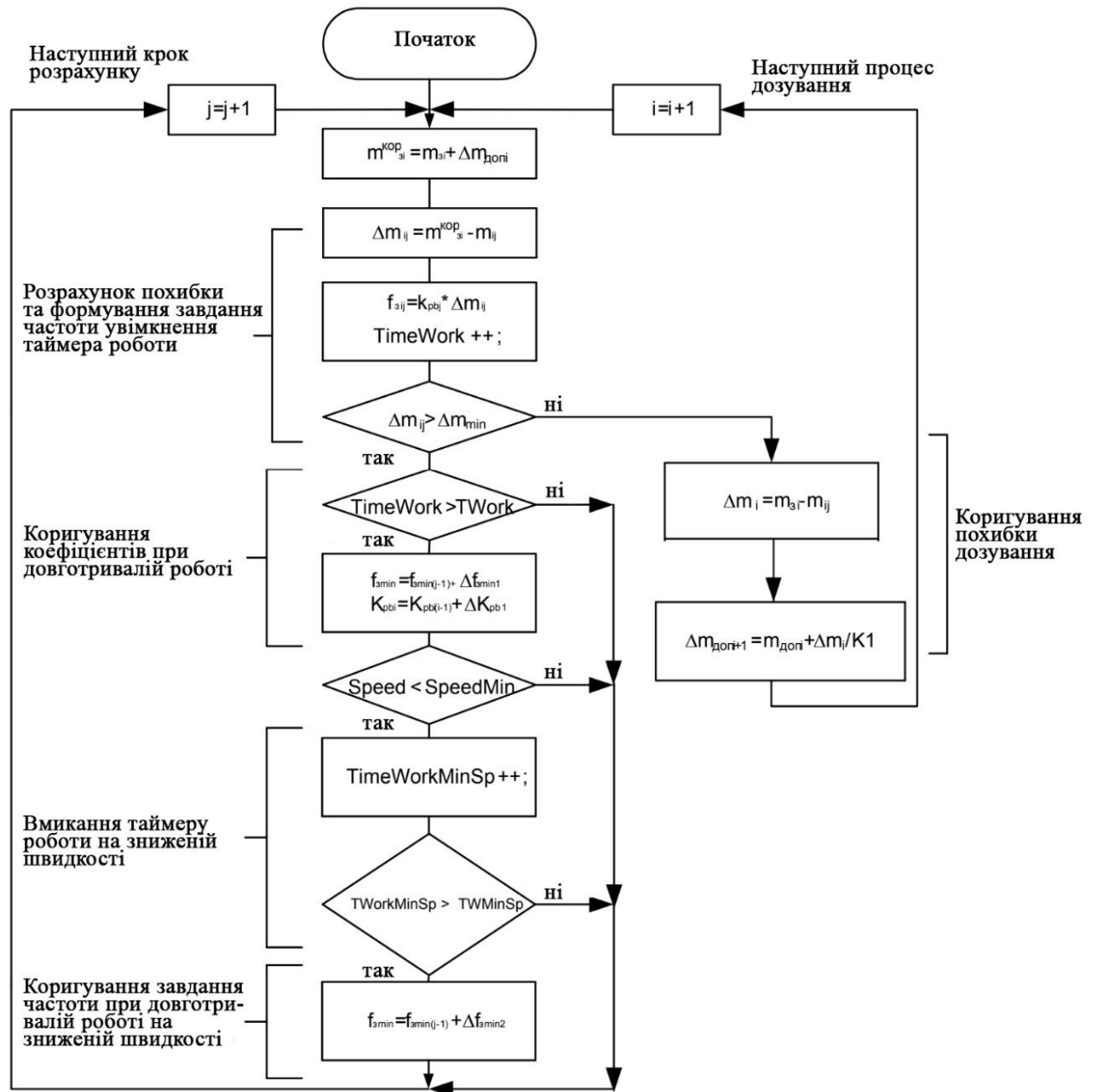


Рисунок 4.7 - Блок-схема алгоритму коригування завдання частоти шнекового дозатора

Вихідним параметром є помилка дозування за вагою попереднього дозування.

$$\Delta m_{i-1} = m_{3i-1} - m_{i-1}, \quad (4.12)$$

де m_{3i-1} - задана маса; m_{i-1} - відпрацьована маса.

На рисунку 4.9 зображено графік перехідного процесу дозування одного кілограма матеріалу без алгоритму корекції завдання на основі статистичних даних.

Під час пуску без використання алгоритму коригування спостерігаємо абсолютну помилку дозування 0,191 кг або відносну помилку - 19,1% дозованої речовини.

При застосуванні алгоритму корекції завдання на основі статистичних даних дозволило зменшити абсолютну помилку дозування у 2,65 рази, і це наглядно наведено на рисунку 4.9. Отримана помилка дозування становить 0,072 кг, або 7,2% від маси дозованого матеріалу, що у 2,4 рази перевищує регламентовану норму для приготування суміші комбікорму.

Для подальшого зменшення помилки дозування до рівня 3% необхідно використовувати алгоритм компенсації помилки, зумовленої масою падаючого стовпа речовини.

4.4 Алгоритм коригування помилки, зумовленої масою падаючого стовпа речовини

Під час дозування сипучих речовин тензодатчики фіксують вагу матеріалу, який фактично перебуває в бункері. Якщо не враховувати вагу падаючого стовпа речовини, що знаходиться в повітрі після зупинки шнека, можливо отримати значну кінцеву помилку дозування. У деяких системах дозування маса падаючого стовпа може сягати кількох десятків кілограмів. Для компенсації маси падаючого стовпа необхідно враховувати її під час формування завдання системі керування. Маса, яка не вимірюється датчиками ваги, вже перебуває всередині бункера у стані падіння. Щоб врахувати її, до сигналу зворотного зв'язку потрібно додати величину обчисленої маси падаючого стовпа.

Блок-схема алгоритму врахування маси падаючого стовпа наведена на рисунку 4.10.

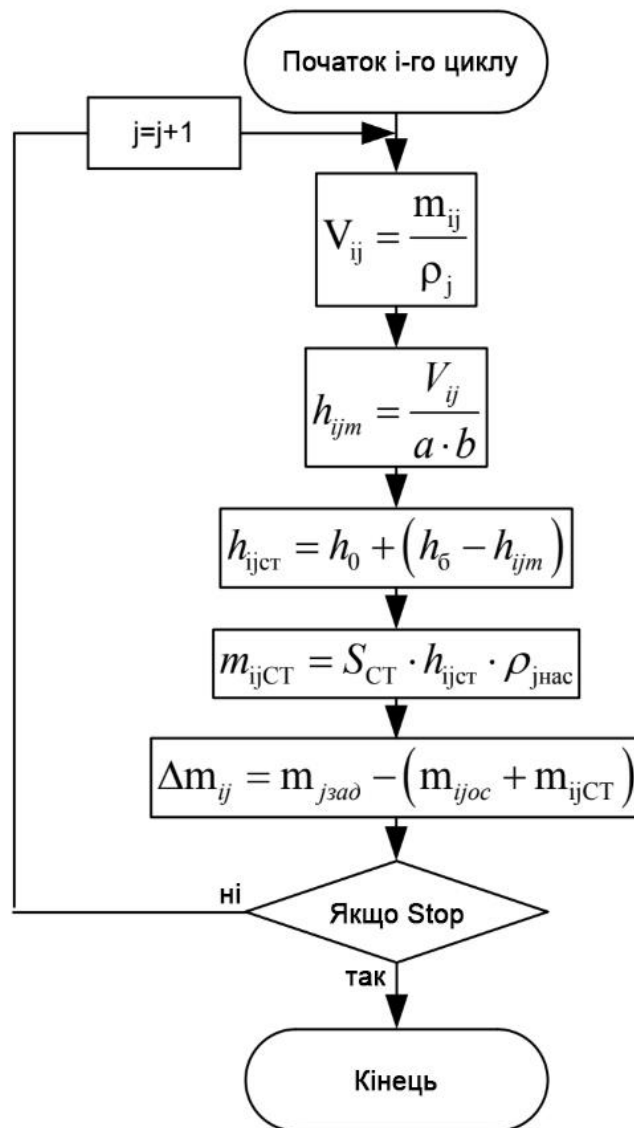


Рисунок 4.10 - Блок-схема алгоритму врахування маси падаючого стовпа

У систему керування надходить виміряна величина маси дозованого матеріалу в бункері. Якщо відома насипна вага речовини γ , а бункер має форму паралелепіпеда, масу падаючого стовпа можна розрахувати за формулою (3.36).

Геометричні розміри бункера та щільність матеріалу задаються в алгоритмі керування як постійні величини. Для контролю маси падаючого стовпа необхідна інформація з датчиків ваги. Підставляючи у формулу (3.36) значення площі падаючого стовпа $S_{\tilde{n}o}$ з формули (3.35) і висоти падаючого стовпа $h_{\tilde{n}o}$, розрахованої за формулою (3.34), та виконуючи перетворення з урахуванням формул, отримуємо вираз для визначення маси падаючого стовпа.

$$m_{cm} = \left[\frac{\pi}{4} \cdot (D_0^2 - d_0^2) \right] \cdot \left[h_0 + \left(h_\delta - \frac{m}{p \cdot a \cdot b} \right) \right] \cdot \gamma. \quad (4.15)$$

Потім розраховуємо помилку дозування, з урахуванням коригування маси падаючого стовпа речовини, яка потрапляє на вхід регулятора ваги в алгоритмі керування:

$$\Delta m = m_{зад} - (m_{oc} + m_{cm}), \quad (4.16)$$

де $m_{зад}$ - задана маса речовини; m_{oc} - маса, отримана по сигналу зворотного зв'язку.

Для імітаційного моделювання згідно формулам, наведених вище, будуємо структурну схему (рис. 4.11).

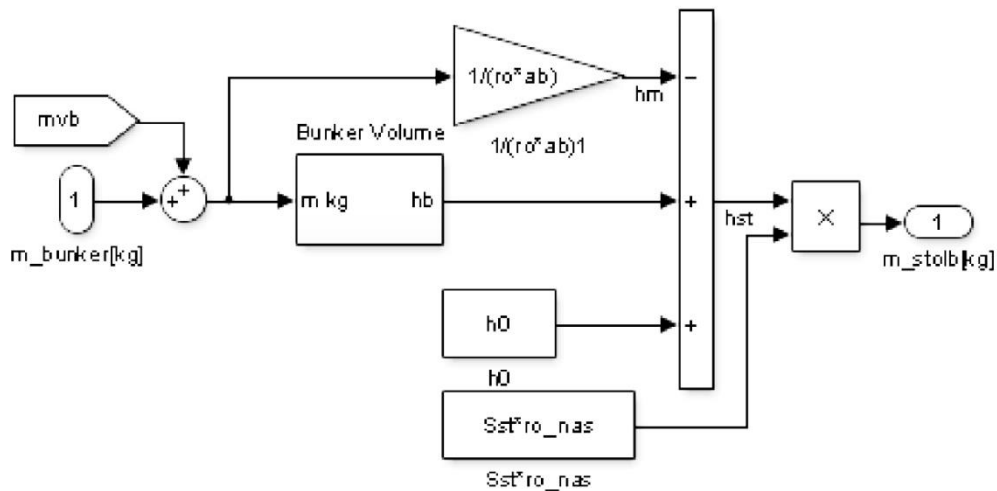


Рисунок 4.11 – Імітаційна модель алгоритму розрахунку маси падаючого стовпа речовини

Підвищення точності системи дозування сипучих речовин можна досягти шляхом використання спільного застосування вищерозглянутих алгоритмів коригування помилки дозування.

Імітаційна модель комплексного застосування алгоритму врахування впливу маси падаючого стовпа в бункер дозатора та алгоритму коригування похибки на основі статистичних даних представлена на рисунку 4.12.

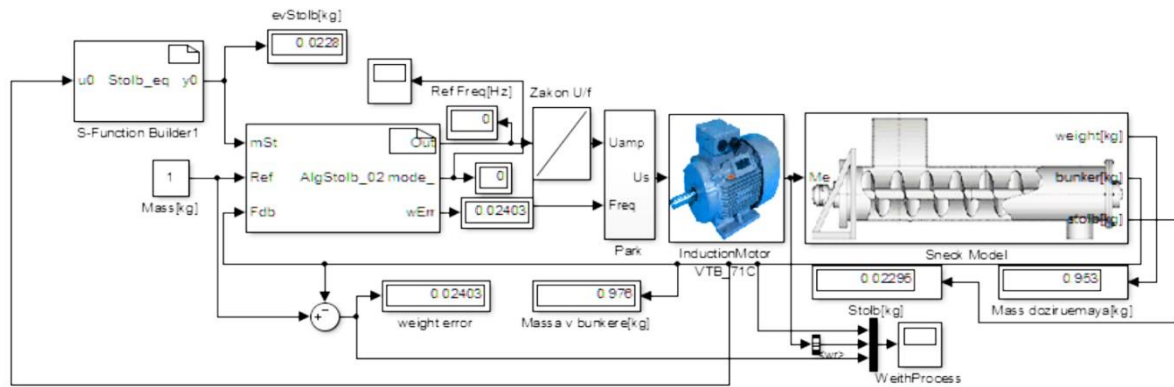


Рисунок 4.12 – Комплексна імітаційна модель коригування похибки

Результати імітаційного моделювання дозування 1 кілограма сипучої речовини за спільного використання алгоритмів компенсації похибки наведено на рисунку 4.13, з якого видно, що застосування алгоритмів компенсації похибки дозування дає змогу зменшити абсолютну похибку дозування в 7,07 разів, порівняно з дозуванням на імітаційній моделі з релейним регулятором ваги без використання алгоритмів коригування похибки (рис. 3.19), а результуюча похибка дозування становила 2,7 %, що відповідає вимогам технічного регламенту приготування комбікорму ($\pm 3\%$).

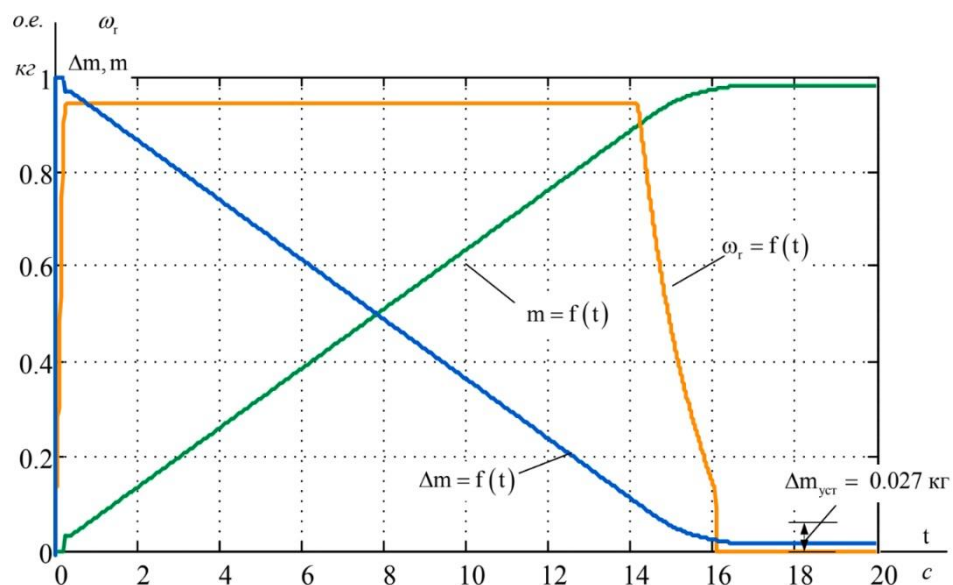


Рисунок 4.13 – Дозування при сумісному використанні алгоритмів коригування похибки

На імітаційній моделі було проведено серію експериментів під час дозування речовин різної ваги за спільного використання алгоритмів коригування завдання на основі статистичних даних і компенсації помилки дозування, спричиненої масою падаючого стовпа речовини. Результати моделювання дозування 2 і 3 кілограмів матеріалу за використання алгоритмів корекції помилки наведено на рис. 4.14 та 4.15.

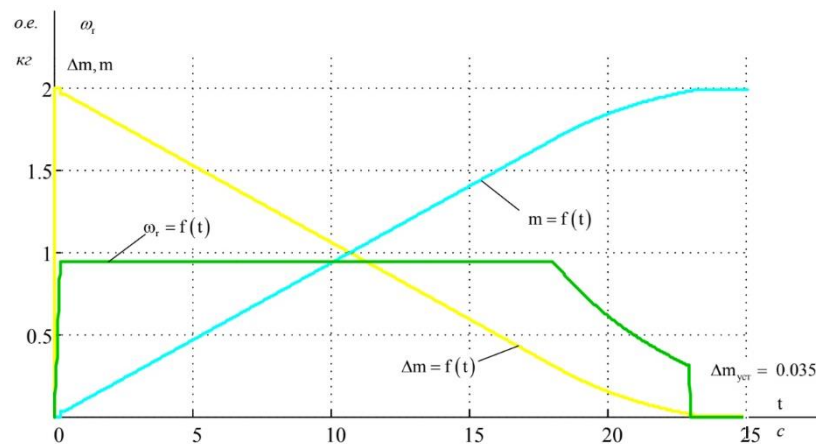


Рисунок 4.14 – Результати моделювання дозування 2 кг речовини при використанні алгоритмів коригування похибки

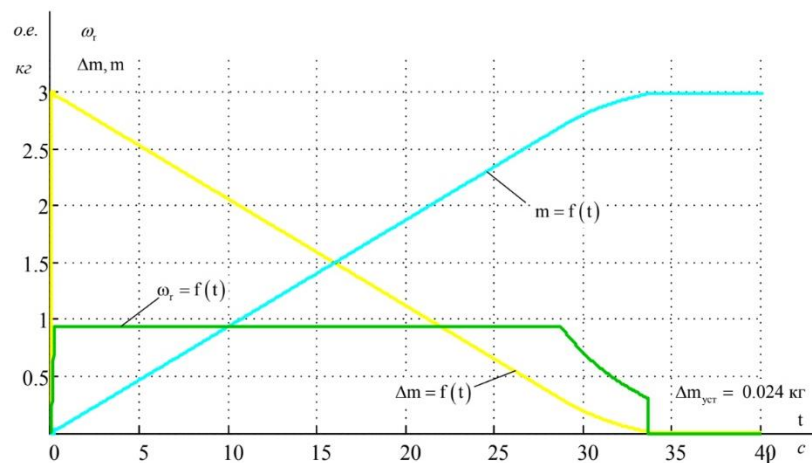


Рисунок 4.15 - Результати моделювання дозування 3 кг речовини при використанні алгоритмів коригування похибки

Гістограма, що показує значення похибки за декілька циклів дозування різного завдання ваги, зображена на рис. 4.16. Синім кольором показано

результати роботи алгоритму коригування похибки за статистичними даними, а зеленим кольором наведено результати роботи алгоритму коригування похибки за статистичними даними із застосуванням алгоритму компенсації похибки, викликаної масою падаючого стовпа речовини.

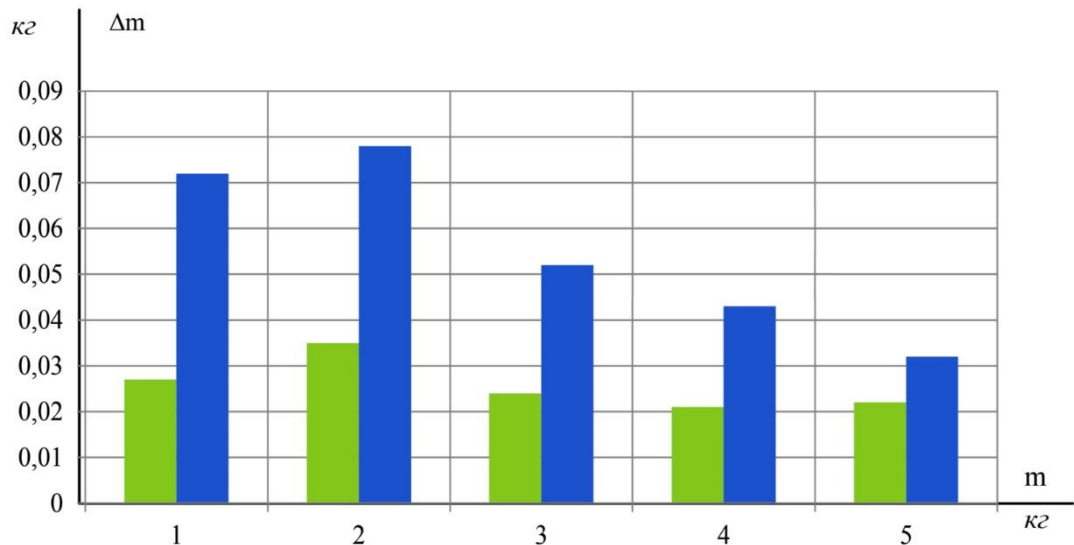


Рисунок 4.16 – Гістограма похибки при використанні алгоритмів сигнальної адаптації

З наведеної гістограми видно, що у першому циклі дозування абсолютна похибка є максимальною, але в наступних циклах спостерігається тенденція до її зменшення. Це можна пояснити тим, що алгоритм компенсації похибки використовує результати попереднього дозування для корекції поточного.

Розроблені алгоритми базуються на використанні статистичних даних для кожного компонента, що дозується, окремо. Було проведено серію експериментів на імітаційній моделі з дозування компонентів комбікорму, таких як пшениця, ячмінь, горох, висівки, соняшниковий шрот.

Статистичні дані складаються з 5 циклів дозування кожної речовини масою 1 кілограм. Результати похибки дозування для кожного циклу наведено таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Результати похибки дозування

Цикл	Помилка дозування, Δm , кг					
	ячмінь	пшениця	горох	висівки	кукурудза	соняшниковий шрот
1	0,102	0,098	0,096	0,175	0,089	0,124
2	0,02	-0,03	-0,032	0,012	0,011	0,028
3	0,007	0,006	0,005	0,011	0,009	0,01
4	0,007	0,008	0,006	0,009	0,008	0,008
5	0,009	0,01	0,011	0,008	0,008	0,01

Графіки залежності похибки від циклу дозування для кожної речовини наведені у рисунку 4.17.

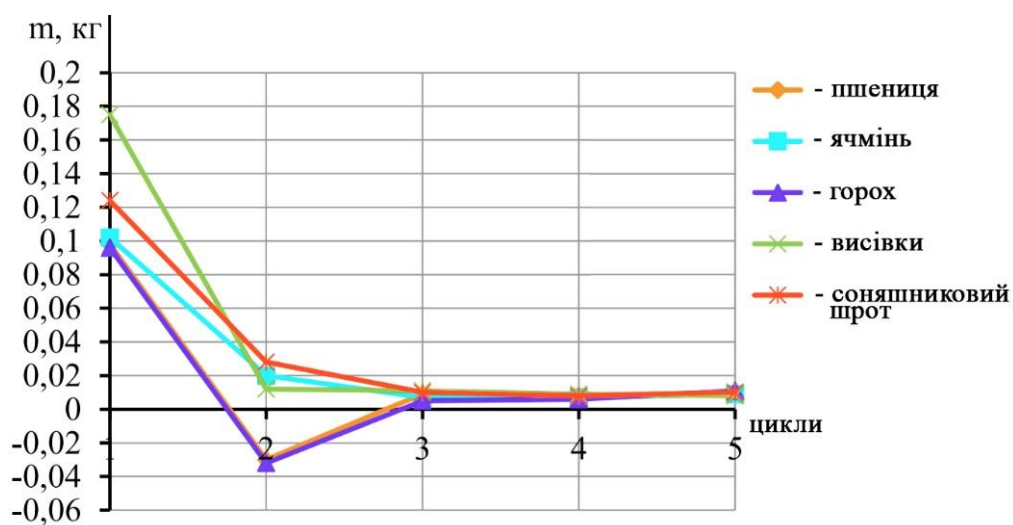


Рисунок 4.17 – Статистичні дані дозування компонентів комбікорму

Перший цикл дозування проводився без використання алгоритмів коригування похибки дозування, тому абсолютна похибка є максимальною і перевищує допустиме значення. Як видно з рисунка 4.17, алгоритми коригування похибки у перших циклах дозування знижують абсолютну похибку дозування до допустимого рівня, а згодом утримують її у мінімальному діапазоні, забезпечуючи таким чином якість приготування комбікорму.

У збільшеному масштабі діаграма дозування наступних циклів наведена на рис. 4.18.

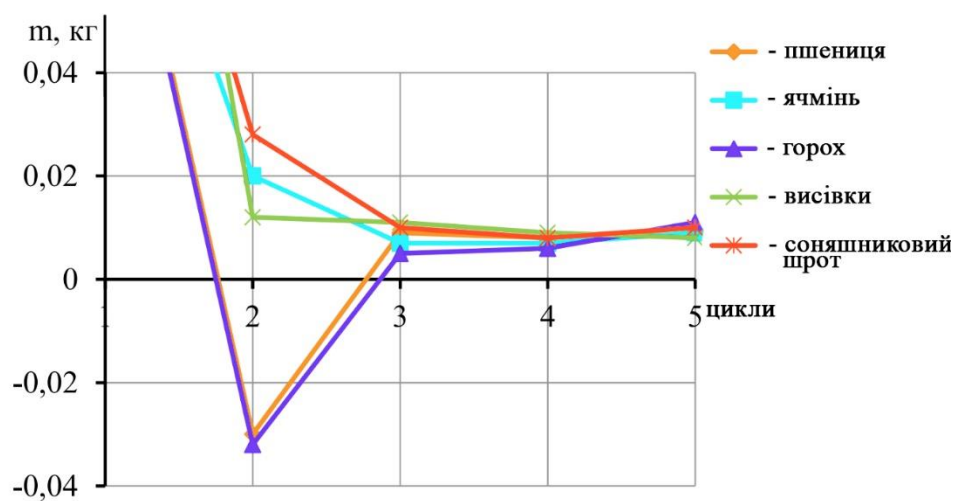


Рисунок 4.18 – Статистичні дані дозування компонентів комбікорму

Висновки

1. В результаті аналізу існуючих технічних рішень для дозування сипучих речовин, а також характеристик сипучих речовин, було встановлено, що для досягнення поставленої мети потрібно розробити модель системи автоматизації дозування сипучих речовин з єдиним перетворювачем частоти та бункером-дозатором, який обладнаний тензодатчиками та розробити ефективні алгоритми керування електротехнічним комплексом виробництва комбікормів для забезпечення заданої точності дозування компонентів (3%) при максимальній продуктивності шнекових дозаторів.

2. Дослідження імітаційної моделі показали, що горизонтальне розташування шнекового дозатора є найбільш продуктивним.

Для мінімізації впливу маси "падаючого стовпа" на точність дозування визначено послідовність використання компонентів рецепту, яка полягає в тому, що першочергово необхідно підключати шнекові живильники, які забезпечують потрапляння в бункер-дозатор речовини з найбільшою масою.

3. Розроблено алгоритм сигнальної адаптації на основі статистичних даних для керування електроприводом автоматизованої системи дозування сипучих речовин, який дозволив зменшити абсолютну похибку дозування майже в 2,5 рази.

4. Спільне використання алгоритмів коригування похибки дозування на основі статистичних даних та компенсації похибки, викликаной вагою падаючого стовпа, забезпечує максимальну точність системи. Застосування розроблених алгоритмів дозволяє збільшити точність дозування до 7 раз, а кінцева похибка дозування дорівнює 2,7%, що відповідає технічному регламенту виробництва комбікормових сумішей.

Список літератури

1. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування : навч. посіб. / О. Барало та ін. Київ : Аграрна освіта, 2010. 557 с.
2. Асинхронні двигуни. <http://univer.nuczu.edu.ua>. URL: <http://univer.nuczu.edu.ua/e-books/326/560.html> (дата звернення: 31.10.2024).
3. Босов Є. П. , Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.
4. Дослідження основних властивостей сипких матеріалів [Електронне видання]: методичні вказівки до виконання практичного заняття з дисципліни: «Технологічне обладнання підприємств зберігання та переробки зерна» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спеціальністю 181 Харчові технології : електроні дані / уклад.: П. Гурський, С. Іващенко, О. Маяк. Харків : ДБТУ, 2024. 37 с. URL: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/55087/1/MV_Doslidzhennya_sypkykh_materialiv_181_24.pdf (дата звернення: 11.10.2024).
5. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. : Афіша, 2004. 250 с.
6. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.
7. Імітаційне моделювання систем. <https://stud.com.ua/>. URL: https://stud.com.ua/163931/informatika/imitatsiyne_modelyuvannya_sistem (дата звернення: 19.11.2024).
8. Калашніков Є. Моделі та засоби автоматизації процесів керування дозуванням сипких матеріалів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07. Харків, 2011. 25 с. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/42c7c1d2-d39e-46c0-97b6-8161216c816d/content> (дата звернення: 03.10.2024).

9. Конституція України. Київ : Центр навчальної літератури, 2024. 64 с.
10. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 30.10.2024).
11. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення: 09.10.2024).
12. Моделювання електромеханічних систем : підручник / О. Чорний та ін. Кременчук, 2001. 410 с
13. Лозинський А., Мороз В., Паранчук Я. Розв'язування задач електромеханіки в середовищі пакетів MathCAD і MATLAB : навч. посіб. Львів : Вид-во Держ. університету "Львівська політехніка", 2000. 166 с.
14. Основи розрахунку обладнання для дозування сипучих та рідких матеріалів. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/ophv/wp-content/uploads/sites/13/lekcija-4-osnovy-rozrahunku-obladnannja-dlja-dozuvannja-sypuchyh-ta-ridkyh-materialiv.pdf> (дата звернення: 17.10.2024).
15. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення: 01.11.2024).
16. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 20.10.2024).
17. Панкратов А. Системи керування електроприводами : навч. посіб. Краматорськ : Донбас. держ. машинобуд. акад., 2018. 228 с.
18. Про систему громадського здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#n840> (дата звернення: 02.11.2024).
19. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення: 02.11.2024).

20. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14> (дата звернення 29.10.2024).
21. Правила улаштування електроустановок : вид. офіц. К. : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
22. Технічні характеристики електродвигуна AIP 90 L4.
URL: https://ventilator.ua/product/elektrodivigatel-air-90-l4/?srsltid=AfmBOoqnl-q4rQK6qwkQ1MmEG485n-Vuk4Uvi8PtJV7cF1axUij_AwtT#techincal (дата звернення: 21.10.2024).
23. Толочко О. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 151 с.
24. Matlab Documentation.[Електронний ресурс]. - Режим доступу: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>.
25. Simulink Documentation [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>.

ДОДАТОК А

ОХОРОНА ПРАЦІ

А.1 Законодавчі та нормативні акти України з питань охорони праці

Сучасний розвиток науки та техніки привносить принципові нововведення у всі сфери матеріального виробництва, суттєво змінюючи технологічні процеси та використовувані матеріали, предмети та знаряддя праці. В свою чергу зміни технології та устаткування призводять до трансформації умов праці та трудового процесу в цілому. Тому при розробці нової техніки, технологічних процесів, організації виробництва необхідно провести науковий аналіз можливих небезпечних та шкідливих виробничих факторів та розробити заходи і засоби, спрямовані на мінімізацію їх несприятливого впливу на працюючу людину.

Охорона праці (ОП) – це система законодавчих актів, соціально-економічних, організаційних, технічних, гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці [3, 5, 6].

В Україні діють закони, які визначають права та обов'язки її мешканців, а також організаційну структуру органів влади і промисловості. Конституція України [3, 5] – Основний Закон держави – була прийнята Верховною Радою України 28.06.1996 р. Вона декларує рівні права і свободи всім жителям держави: на вільний вибір праці, що відповідає безпечним і здоровим умовам, на відпочинок, на соціальний захист у разі втрати працездатності та у старості й деякі інші. Всі закони і нормативні документи повинні узгоджуватися, базуватися і відповідати статтям Конституції. Конституція гарантує громадянам України [9]:

- право на працю (стаття 43);
- право на відпочинок (стаття 45);
- право на соціальний захист (стаття 46).

Правовою основою законодавства щодо ОП, крім Конституції України,

є ще загальні Закони України, а також спеціальні юридичні акти.

Серед Законів України в цій царині можна виділити: «Про охорону праці», «Основи законодавства України про охорону здоров'я», «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування», а також Кодекс цивільного захисту України (КЦЗ) і Кодекс законів про працю України (КЗпП) [6].

Спеціальними юридичними документами в галузі ОП є Нормативно-правові акти з ОП (НПАОП), Державні стандарти України (ДСТУ), різноманітні санітарні норми і правила, Правила улаштування електроустановок (ПУЕ), норми технічного проектування та інші нормативні акти, виходячи із сфери їх дії [3, 5, 6].

Основоположним законодавчим актом в галузі ОП є Закон України «Про охорону праці» [16], дія якого поширюється на всі підприємства, установи і організації незалежно від форм власності та видів їх діяльності, на усіх громадян, які працюють, а також залучені до праці на цих підприємствах.

Верховна Рада України прийняла цей Закон України 14 жовтня 1992 року. Він визначає основні положення щодо реалізації конституційного права громадян на охорону їх життя і здоров'я в процесі трудової діяльності, регулює, за участю відповідних державних органів, відносини між власником підприємства, установи і організації, або уповноваженим ним органом, і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації ОП в Україні.

Специфічною особливістю Закону України «Про охорону праці» є високий рівень прав і гарантій робітникам. Вперше в історії держави працівникам було надано право відмовитися від роботи у випадку існування на виробництві загрози для їхнього здоров'я і життя. Розширено права робітників у соціальних гарантіях відшкодування збитків у випадку пошкодження їх здоров'я на виробництві. Передбачається нова система фінансування ОП, формування системи страхування від нещасних випадків і профзахворювань,

посилюється централізація планування. Договірне регулювання з питань ОП поставлено на високий рівень, передбачається значна участь громадських інституцій у цьому процесі. До позитивних моментів Закону безперечно належить закріплення за державою функції управління ОП. У колишньому СРСР ця функція була покладена на громадські організації в особі профспілок [3, 5, 16].

Відповідно до статті 49 Закону України «Про охорону праці» [16], за порушення законодавчих та інших нормативних актів про охорону праці, створення перешкод для діяльності посадових осіб органів державного нагляду за охороною праці і представників професійних спілок винні працівники притягаються до дисциплінарної, кримінальної відповідальності, згідно із законодавством.

Закон України «Основи законодавства України про охорону здоров'я» [15], від 19 листопада 1992 року, визначає правові, організаційні, економічні та соціальні засади охорони здоров'я в Україні, регулює суспільні відносини у цій галузі з метою забезпечення гармонійного розвитку фізичних і духовних сил, високої працездатності і довголітнього активного життя громадян, усунення факторів, що шкідливо впливають на їх здоров'я, попередження і зниження захворюваності, інвалідності та смертності, поліпшення спадковості.

Закон України «Про систему громадського здоров'я» [18], від 6 вересня 2022 року, передбачає розробку й реалізацію адміністрацією підприємств санітарних та протиепідемічних заходів; здійснення лабораторного контролю за дотриманням вимог санітарних норм стосовно рівнів шкідливих факторів виробничого середовища; формування органів та установ державної санепідеміологічної служби при надзвичайних подіях або ситуаціях, що становлять небезпеку для здоров'я населення; відшкодування, в установленому порядку, працівникам та іншим громадянам збитків, яких завдано їх здоров'ю, в результаті порушення санітарного законодавства.

Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [19], від 8 лютого 1995 року, визначає пріоритети безпеки людини та

навколишнього природного середовища, права та обов'язки у сфері використання ядерної енергії, регулює діяльність, пов'язану з експлуатацією ядерних установок і джерел іонізуючого випромінювання, встановлює правові основи міжнародних зобов'язань України, щодо використання ядерної енергії та ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС. В цьому Законі закріплені основні принципи державної політики в сфері використання ядерної енергії та радіаційного захисту [3, 5, 19]:

- пріоритет захисту людини та навколишнього середовища від впливу іонізуючого випромінювання;
- забезпечення безпеки під час використання ядерної енергії;
- відкритість та доступність інформації, пов'язаної з використанням ядерної енергії тощо.

Враховуючи міжнародний досвід, був розроблений Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування» [20], від 23 вересня 1999 року. Цей Закон гарантує право громадян на соціальний захист, яке проголошується Конституцією України, зокрема в разі повної, часткової або тимчасової втрати працездатності. Окрім того, він створює правове поле, фінансові й організаційні механізми для успішного розв'язання триєдиного завдання: запобігання нещасним випадкам і професійним захворюванням, відновлення здоров'я та працездатності потерпілих на виробництві, компенсації потерпілим матеріальних збитків внаслідок ушкодження здоров'я [3, 5, 20].

КЦЗ України [10], від 2 жовтня 2012 року, регулює відносини, пов'язані із захистом населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від надзвичайних ситуацій, реагуванням на них, функціонуванням єдиної державної системи цивільного захисту, та визначає повноваження органів державної влади, Ради міністрів Автономної Республіки Крим, органів місцевого самоврядування, права та обов'язки громадян України, іноземців та осіб без громадянства, підприємств, установ та організацій, незалежно від форми власності.

Завданнями КЗпП України [11] є врегулювання трудових відносин між працівниками і роботодавцями, сприяючи зростанню продуктивності праці, поліпшенню якості роботи, підвищенню ефективності суспільного виробництва і піднесенню на цій основі матеріального і культурного рівня життя трудящих, зміцненню трудової дисципліни і поступовому перетворенню праці на благо суспільства в першу життєву потребу кожної працездатної людини. КЗпП ще з часів УРСР, від 10 грудня 1971 року, встановлює високий рівень умов праці, всемірну охорону трудових прав працівників.

НПАОП, які до початку 2003 року носили назву Державні нормативні акти про ОП (ДНАОП), – це правила, норми, положення, стандарти, інструкції та інші документи, обов’язкові до виконання [3, 5]. Законодавством передбачено, що, залежно від сфери дії, НПАОП можуть бути міжгалузевими і галузевими. НПАОП поширюються на всі підприємства, установи й організації незалежно від підпорядкування та форми власності, на підприємців, фермерів та інших юридичних і фізичних осіб, які займаються виробництвом сільськогосподарської продукції.

Серед нормативно-правових актів важливе місце посідають ДСТУ, які з 2022 року повністю замінили Міждержавні стандарти (ГОСТ ССРСР). Державна система стандартів з питань ОП – це комплекс взаємопов’язаних стандартів, спрямованих на забезпечення безпеки праці, збереження здоров’я і працездатності людини в процесі праці. ДСТУ почали розроблятися з 1992 року [3].

Складовою частиною права в галузі гігієни праці є постанови та положення (норми) затверджені Міністерством охорони здоров’я України (наприклад, «Положення про медичний огляд працівників певних категорій», «Перелік важких робіт і робіт з шкідливими і небезпечними умовами праці, на яких забороняється застосування праці неповнолітніх»), Державні санітарні правила і норми (ДСанПіН) стосовно окремих факторів виробничого середовища, певних технологічних процесів і конкретних виробництв, Державні санітарні норми (ДСН), Державні санітарні правила (ДСП) [3, 5].

При роботі з електроустановками, мають бути дотримані вимоги ПУЕ, які визначають будову, принципи улаштування, особливі вимоги до окремих систем, їх елементів, вузлів і комунікацій електроустановок, встановлюють вимоги до електроустановок загального призначення змінного струму напругою до 750 кВ та постійного струму напругою до 1,5 кВ [21].

Власники підприємств, установ, організацій, або уповноважені ними органи, розробляють, на основі НПАОП, і затверджують власні положення, інструкції або інші нормативні акти з ОП, що діють у межах підприємства, установи, організації [3, 5]. Порядок опрацювання і затвердження власником нормативних актів з ОП, діючих на підприємстві, передбачений Законом України «Про охорону праці». Ці нормативні акти спрямовані на побудову чіткої системи управління ОП та забезпечення в кожному структурному підрозділі й на робочому місці безпечних і нешкідливих умов праці. На кожному підприємстві ці нормативні акти підлягають затвердженню (погодженню) трудовим колективом (наприклад, «Положення про систему управління ОП на підприємстві» «Положення про комісію з ОП підприємства», «Положення про уповноважених трудових колективів з питань ОП», «Загальнооб'єктові та цехові інструкції про заходи пожежної безпеки» тощо). Нормативні акти з ОП, що діють у межах підприємства, повинні відповідати чинному законодавству і вимогам державних міжгалузевих та галузевих НПАОП. При цьому відхилення допускається виключно у бік покращення умов для працівника [5].

Держава виступає гарантом створення безпечних і нешкідливих умов праці для співробітників підприємств, установ, організацій всіх форм власності.

А.2 Шкідливі та небезпечні фактори виробництва при експлуатації системи автоматичного дозування сипучих матеріалів

В ДСТУ 2293-93 «Охорона праці. Терміни та визначення» та деяких інших стандартах даються визначення основних понять та термінів в галузі ОП.

Шкідливий фактор виробництва – виробничий чинник, вплив якого може призвести до погіршення стану здоров'я, зниження працездатності працівника.

Небезпечний фактор виробництва – виробничий чинник, дія якого за певних умов може призвести до травм або іншого раптового погіршення здоров'я працівника.

Всі небезпечні та шкідливі фактори, за природою дії, поділяються на такі групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні.

До визначаючих ознак небезпечних і шкідливих факторів відносяться: можливість безпосередньої негативної дії на організм людини; ускладнення нормального функціонування органів людини; можливість порушення нормального стану елементів виробничого процесу, в результаті якого можуть виникнути аварії, вибухи, пожежі, травми.

Розглянемо основні небезпеки та шкідливості, які можуть впливати на працівників на будь-якому виробництві, під час дозування сипучих матеріалів.

Серед фізичних небезпечних та шкідливих виробничих факторів, можна виділити:

- наявність рухомих частин обладнання, що можуть завдати фізичних ушкоджень;
- шуми та вібрації устаткування;
- несприятливі параметри мікроклімату на робочих місцях;
- недостатній рівень освітлення на робочих місцях;
- пожежна безпека;
- небезпечні рівні напруги у електричних колах.

Слід особливо звернути увагу на останню позицію, оскільки з кожним роком зростає виробництво та споживання електроенергії, а відтак і кількість людей, які в процесі своєї життєдіяльності використовують електричні пристрої та установки. Отже, питання електробезпеки набувають особливої ваги.

Основними причинами електротравматизму на виробництві є: випадкове доторкання до неізольованих струмопровідних частин

електроустаткування; використання несправних ручних електроінструментів; застосування нестандартних або несправних переносних світильників напругою 220 чи 127В; робота без надійних захисних засобів та запобіжних пристосувань; доторкання до незаземлених корпусів електроустаткування, що опинилися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції; недотримання правил улаштування, технічної експлуатації та правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок та ін.

Електрообладнання, з яким доводиться мати справу практично всім працівникам на виробництві, становить значну потенційну небезпеку ще й тому, що органи чуття людини не здатні на відстані виявляти наявність електричної напруги. В зв'язку з цим захисна реакція організму проявляється лише після того, як людина потрапила під дію електричної напруги. Проходячи через організм людини електричний струм справляє на нього термічну, електролітичну, механічну та біологічну дію.

З хімічних небезпечних та шкідливих виробничих факторів при дозуванні сипучих матеріалів особливий вплив та працюючих мають:

- використання у технологічних процесах хімічних речовин і сполук, їх накопичення та складування;
- застосування змащувальних і охолоджувальних речовин для насосного обладнання;
- можливість потрапляння шкідливих випаровувань у повітрі робочої зони.

Біологічні небезпечні й шкідливі виробничі фактори включають патогенні мікроорганізми, мікробні препарати, біологічні пестициди, гризуни.

Психофізичні небезпечні і шкідливі фактори виробництва за характером дії поділяються на фізичні перевантаження (статичні і динамічні) та нервово-психологічні (розумова перенапруга, монотонність праці, емоційні перевантаження).

Один і той же виробничий фактор за природою своєї дії може належати одночасно до різних груп.

Дія окремих несприятливих факторів виробничого середовища може призвести до виробничої травми – порушення анатомічної цілісності організму людини або його функцій внаслідок впливу виробничих факторів [3, 5, 6].

А.3 Заходи з усунення або зменшення впливу небезпечних та шкідливих факторів виробництва при експлуатації системи автоматичного дозування сипучих матеріалів

Заходи щодо попередження нещасних випадків передбачають роботу з монтажу, технічного обслуговування і ремонту устаткування в суворій відповідності з вимогами правил і інструкцій з техніки безпеки. Виробнича санітарія передбачає комплекс організаційних, гігієнічних і санітарно-технічних заходів, що запобігають впливові шкідливих виробничих факторів на працюючих.

Для запобігання ушкодженням від механічних частин устаткування використовують:

- огорожі, які перешкоджають проникненню людини у небезпечну зону; огорожувальні пристрої для ізоляції систем приводу машин і агрегатів, капоти, якими закривають рухомі елементи виробничого обладнання (шліфувальних кругів, фрез, зубчастих коліс, приводних ременів, ланцюгів передач тощо).

- гальмівні пристрої, призначені для уповільнення або зупинки виробничого устаткування при виникненні небезпечного виробничого фактора: механізми та обертові деталі, які, за характером роботи, неможливо захистити, забезпечують електромагнітними, механічними, ручними, педальними або іншими гальмівними пристроями, а також системами, перемикаючими двигун на зворотний хід (деякі з конструкцій гальмівних пристроїв виконуються комбінованими).

Загальні методи боротьби з вібрацією класифікуються так [3, 5, 6]:

- зниження вібрацій в джерелі виникнення, шляхом зниження, або усунення збуджувальних сил;

- вібродемпфування;

- динамічне гасіння;

- віброізоляція;

- використання індивідуальних засобів захисту.

Для захисту від шуму необхідно [3, 5, 6]:

- боротися із шумом в джерелі його виникнення;

- знижувати шум звукопоглинанням та звукоізоляцією;

- знижувати шум акустичною обробкою приміщень;

- використання засобів індивідуального захисту (беруші, навушники, звукопоглинальний спецодяг).

Для запобігання виникненню пожеж на підприємстві, у виробничих приміщеннях, де відбувається дозування сипких матеріалів, необхідно передбачити систему протипожежного захисту.

Попередження розповсюдження пожеж, в основному визначається пожежною безпекою будівель та споруд і забезпечується: правильним вибором необхідного ступеня вогнестійкості будівельних конструкцій; правильними об'ємно-планувальними рішеннями будівель та споруд; розташуванням приміщень та виробництв, з урахуванням вимог пожежної безпеки; встановленням протипожежних перешкод в будівлях, системах вентиляції, паливних та кабельних комунікаціях обмеженням витікання та розтікання горючих рідин при пожежі; улаштуванням протидимного захисту; проектуванням шляхів евакуації; заходами щодо успішного розгортання тактичних дій по гасінню пожежі.

Загальні заходи та засоби нормалізації параметрів мікроклімату включають в себе:

- удосконаленням технологічних процесів та устаткування;

- раціональним розміщенням технологічного устаткування;

- автоматизацією та дистанційним керуванням технологічними

процесами;

- раціональним поєднанням систем вентиляції, опалення та кондиціонування повітря;
- застосуванням теплоізоляції устаткування та захисних екранів;
- раціоналізацією режимів праці та відпочинку;
- використанням засобів індивідуального захисту.

Для забезпечення нормальних робочих параметрів повітря робочої зони, вилучення небезпечних та шкідливих хімічних, біологічних речовин, а також пилу, необхідно передбачити і розрахувати оптимальну систему штучної вентиляції [3, 5, 6].

Для запобігання шкідливих результатів недостатнього освітлення необхідна наявність раціонального освітлення приміщень та робочих місць. При проектуванні природного та штучного освітлення в виробничих і допоміжних будівлях та приміщеннях, а також штучного освітлення на території підприємства необхідно враховувати вимоги будівельних норм та правила по проектуванню природного та штучного освітлення, а також вимоги галузевих норм проектування освітлення, розроблених та затверджених у відповідності із встановленим порядком [3, 5, 6].

Найбільш дієвим способом захисту від психофізіологічних небезпечних і шкідливих впливів на працівника є правильна організація його робочого часу та місця роботи. Мають бути раціонально сплановані робочі зміни та час відпочинку, надаватись технологічні та гігієнічні перерви, створюватись позитивний моральний клімат у трудовому колективі.

Застосовувані в електроустановках захисні заходи умовно можна поділити на дві групи [3, 5, 6]: ті, що забезпечують безпеку при нормальному режимі роботи електроустановок і ті, що забезпечують безпеку при аварійному режимі роботи.

Електрична ізоляція [6] – це шар діелектрика або конструкція, виконана з діелектрика, котрим вкривається поверхня струмоведучих частин, або котрим струмоведучі частини відділяються одна від одної. Стан ізоляції

характеризується її електричною міцністю, діелектричними втратами та електричним опором. Ізоляція запобігає протіканню струмів через неї завдяки великому опору.

Захисне заземлення [6] – це навмисне електричне з'єднання із землею або з її еквівалентом металевих нормально не струмопровідних частин, які можуть опинитися під напругою. Призначення захисного заземлення полягає в тому, щоб у випадку появи напруги на металевих конструктивних частинах електроустаткування (наприклад, внаслідок замикання на корпус при пошкодженні ізоляції) забезпечити захист людини від ураження електричним струмом при її доторканні до таких частин. Це досягається шляхом зниження до безпечних значень напруг доторкання до корпусу.

Занулення [6] – це навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним провідником металевих нормально не струмопровідних частин, які можуть опинитись під напругою.

Захисне вимикання застосовується як основний або додатковий захисний засіб, якщо безпека не може бути забезпечена шляхом влаштування заземлення, або іншими способами захисту. Захисне вимикання – це швидкодіючий захист, який забезпечує автоматичне вимкнення електроустановки при виникненні в ній небезпеки ураження струмом [6].

Розрахуємо систему захисного заземлення для електрообладнання виробничого цеху, де відбувається дозування сипучих матеріалів.

А.4 Розрахунок захисного заземлення для електрообладнання виробничого цеху, де відбувається дозування сипучих матеріалів

Небезпека ураження обслуговуючого персоналу електричним струмом виникає при використанні та експлуатації електрообладнання. Небезпечна для людини напруга з'являється на металевих частинах конструкції устаткування при їх випадковому контакті з неізольованим струмопровідним обладнанням. Одним із технічних засобів забезпечення безпеки експлуатації устаткування в

такому аварійному режимі є захисне заземлення .

Принцип дії захисного заземлення – зниження до безпечних значень напруги дотику та кроку, зумовлених замиканням на корпус. Захисна дія заземлення електроустановки полягає у тому, що струм замикання перерозподіляється між заземлюючим пристроєм і людиною обернено пропорційно їхнім електричним опорам. Отже, захисне заземлення повинно мати електричний опір, значно менший по величині, ніж опір тіла людини. Тільки при такій умові на людину, що доторкнулася до ушкодженого устаткування, прийдеться безпечна частина струму. Захисне заземлення складається із: заземлювача і заземлюючого провідника.

Заземлюючий пристрій являє собою сукупність конструктивно об'єднаних провідників і заземлювачів. Заземлюючий провідник – це провідник, який з'єднує частини конструкції, що заземлюються, із заземлювачем. Заземлювач – це сукупність з'єднаних між собою провідників, що знаходяться в стиканні з землею або її еквівалентом. Заземлювачі можуть бути природними і штучними.

До природних заземлювачів відносяться металеві конструкції будівель, надійно з'єднані з землею.

В якості вертикальних електродів використовуються металеві труби, товщиною стінки не менше 3,5 мм та кутникова сталь з товщиною полиць не менше 4 мм (кутникова сталь розміром від 40×40 до 60×60 мм) і довжиною 2,5-3,0 м. Для зв'язку вертикальних електродів і в якості самостійного горизонтального електрода використовується стрічкова сталь перетином не менше 4×12 мм та сталь круглого перетину діаметром не менше 6 мм.

Для установки вертикальних заземлювачів попередньо треба викопати траншею глибиною 0,7-0,8 м, після цього виконують забивку труб або кутків за допомогою механізмів – копрів, гідропресів та інше. Сталеві стержні діаметром 10-12 мм, довжиною 4,0-4,5 м вкручують в землю за допомогою спеціального пристрою, а більш довгі заглиблюють вібраторами.

Верхні кінці занурених в землю вертикальних електродів з'єднують

сталевою стрічкою за допомогою зварювання. В таких же траншеях прокладаються і горизонтальні електроди. При цьому електроди з стрічкової сталі вкладаються ребром, чим забезпечується кращий контакт з землею.

Металеві не струмопровідні частини електрообладнання і електроустановок при порушеній ізоляції між ними і їхніми струмопровідними частинами можуть опинитися під напругою. У таких аварійних умовах дотик до не струмопровідних частин установок рівнозначний дотику до струмопровідних частин.

Усунення небезпеки ураження електричним струмом при такому переході напруги на не струмопровідні частини електроустановок у мережах з ізольованого нейтрально здійснюється за допомогою захисного заземлення.

Розрахунок захисного заземлення має метою визначити основні параметри заземлення – кількість, розміри та розміщення одиночних заземлювачів та заземлюючих провідників, при яких напруга дотику та кроку в період замикання фази на заземлений корпус не перевищують допустимих значень.

Причинами стікання струму в землю є: замикання струмоведучої частини на заземлений корпус електричного обладнання; падіння проводу на землю; використання землі в якості проводу та інше. Таким чином відбувається різкий спад потенціалу φ_z , В, заземлюючої струмоведучої частини до значення, рівного добутку струму, який стікає в землю I_z , А, на опір, який цей струм зустрічає на своєму шляху, тобто опір заземлювача розтікання струму, R_z , Ом:

$$\varphi_z = I_z R_z . \quad (A.1)$$

При розрахунку заземлювачів в однорідній землі використовується спосіб розрахунку провідності заземлювача або спосіб коефіцієнтів використання. Він використовується як при простих, так і при складних конструкціях групових заземлювачів.

Розрахунок заземлення будемо проводити, за методикою, викладеною у [6], для електрообладнання виробничого цеху, де відбувається дозування

сипучих матеріалів.

Початкові дані для розрахунку захисного заземлення:

- 1) обладнання цеху дозування;
- 2) об'єкт – стаціонарний;
- 3) напруга живлення в мережі $U_m = 380$ В;
- 4) природний заземлювач – палі основи будівлі;
- 5) опір природного заземлювача $R_{н.з.} = 16$ Ом;
- 6) тип заземлювача – вертикальний з труби;
- 7) довжина вертикального заземлювача $l_v = 4$ м, діаметр труби $d = 0,04$ м;
- 8) розміщення електродів – по контуру;
- 9) ширина з'єднувальної стрічки $b_c = 0,04$ м;
- 10) ґрунт – чорнозем;
- 11) допустимий опір $R_0 \leq 4$ Ом.

Розрахунок захисного заземлення складається з кількох етапів.

1. Визначаємо розрахунковий струм замикання на землю I_z , А, та норма на опір заземлення r_z в залежності від напруги, режиму нейтралі, потужності електроустановки. У цеху використовується обладнання, напруга живлення якого не перевищує 1000 В. Тому розрахунковий струм замикання на землю не перевищує 10 А, тобто $I_z \leq 10$ А.

2. Визначаємо розрахунковий опір ґрунту з урахуванням кліматичного коефіцієнту ψ за формулою:

$$\rho_{розрах} = \rho_{нит} \cdot \psi, \quad (A.2)$$

де $\rho_{нит}$ – визначається по таблиці приблизних значень питомого опору ґрунту (згідно початкових даних, ґрунт – чорнозем, тоді $\rho_{нит}$, за таблицею, знаходиться в межах $(0,09-5,3) \cdot 10^2$, Ом·м, вибираємо $\rho_{нит} = 2 \cdot 10^2$, Ом·м (при вологості 10-12% до маси ґрунту)); ψ – кліматичний коефіцієнт для сухого ґрунту, згідно таблиці $\psi = 1,5$.

Тоді згідно формули (A.2), маємо:

$$\rho_{розрах} = 2 \cdot 10^2 \cdot 1.5 = 300.$$

3. Згідно початкових даних, опір природного заземлювача $R_{н.з.} = 16$ Ом.

4. Визначаємо опір штучного заземлювача, якщо вважати, що штучні та природні заземлювачі з'єднані паралельно та загальний їх опір не повинен перевищувати R_{∂} , тобто:

$$R_{\partial} = \frac{R_{н.з.} \cdot R_{ш.з.}}{R_{н.з.} + R_{ш.з.}}, \text{ звідки } R_{ш.з.} = \frac{R_{н.з.} \cdot R_{\partial}}{R_{н.з.} - R_{\partial}}. \quad (A.3)$$

Підставивши числові вирази у формулу (A.3), отримаємо:

$$R_{ш.з.} = \frac{16 \cdot 4}{16 - 4} = 5,33.$$

5. Визначаємо опір одного вертикального заземлювача $R_{в.з.}$, з урахуванням розрахункового опору ґрунту $\rho_{розрах}$. Обираємо тип заземлювача – стержньовий у ґрунті, тоді маємо, згідно (рис. A.1), наступні дані та формулу для розрахунку.

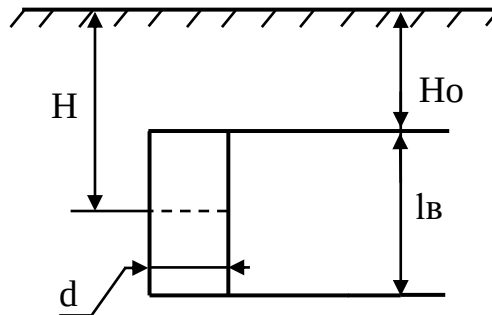


Рисунок A.1 – Схема обраного типу заземлювача:

H_o – глибина закладання заземлювачів в ґрунт, м. (на практиці

$H_o > 0,5$ м);

H – відстань від поверхні землі до середини заземлювача

$$H = H_o + \frac{1}{2} \cdot l_v, \quad (A.4)$$

де l_v – довжина вертикального заземлювача з труб, і дорівнює, згідно вихідних даних 4 м;

d – діаметр труби вертикального заземлювача, згідно вихідних даних

дорівнює 0,04 м.

Приймаємо $H_0 = 0,8$ м, і підставляємо у формулу (А.4), тоді маємо

$$H = 0,8 + \frac{1}{2} \cdot 4 = 2,8.$$

Формула знаходження $R_{в.з.}$ для такої схеми наступна:

$$R_{в.з.} = \frac{\rho_{розрах}}{2 \cdot \pi \cdot l_{в}} \times \left(\ln \frac{2 \cdot l_{в}}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4H + l_{в}}{4H - l_{в}} \right). \quad (A.5)$$

Підставимо числові вирази у формулу (А.5), тоді отримаємо:

$$R_{в.з.} = \frac{300}{2 \cdot 3.14 \cdot 4} \times \left(\ln \frac{2 \cdot 4}{0.04} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2.8 + 4}{4 \cdot 2.8 - 4} \right) = 67.70.$$

6. Попередньо розміщуємо заземлювачі на плані, визначаємо кількість вертикальних заземлювачів n та відстані між ними a , та, за отриманими даними, приймаємо коефіцієнт використання вертикальних стержнів $\eta_{ст}$ при визначенні відстані між електродами (трубами, кутниками) до їх довжини.

Попередня кількість вертикальних заземлювачів розраховується за формулою:

$$n = \frac{R_{в.з.}}{R_{\partial}}. \quad (A.6)$$

Підставивши числові вирази у формулу (А.6), отримаємо:

$$n = \frac{67,70}{4} = 16,92 \approx 17.$$

Таким чином, бачимо, що попередня кількість вертикальних заземлювачів становить 17.

Оскільки відстань між вертикальними заземлювачами повинна приблизно дорівнювати довжині вертикального заземлювача, то приймаємо відстань між заземлювачами 4 м. Таким чином маємо співвідношення

$$Q = \frac{a}{l_{в}} = 1.$$

Роблячи висновки на підставі співвідношення можемо сказати, що коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів, розміщених по контуру, з таблиці, буде дорівнювати $\eta_{cm} = 0,42$.

7. Визначаємо опір з'єднувальної стрічки, з урахуванням коефіцієнта використання стрічки $\eta_{cm} = 0,24$. Опір з'єднувальної стрічки визначається за формулою:

$$R_{з.с.} = \frac{\rho_{розрах}}{2 \cdot \pi \cdot l_{cmp}} \cdot \ln \frac{2 \cdot l_{cmp}^2}{b \cdot H_0}, \quad (A.7)$$

де l_{cmp} – довжина з'єднувальної стрічки, визначається за формулою:

$$l_{cmp} = 1,05 \cdot l_в \cdot n; \quad (A.8)$$

b – ширина з'єднувальної стрічки, м (згідно початкових даних, дорівнює 0,04 м).

Підставивши числові вирази у формулу (A.8), отримаємо:

$$l_{cmp} = 1,05 \cdot 4 \cdot 17 = 71,4.$$

Отже, розраховуємо опір з'єднувальної стрічки за формулою (A.7):

$$R_{з.с.} = \frac{300}{2 \cdot 3,14 \cdot 71,4} \cdot \ln \frac{2 \cdot 71,4^2}{0,04 \cdot 0,8} = 8,5 \text{ Ом.}$$

8. Визначаємо опір одного вертикального заземлювача та з'єднувальної стрічки з урахуванням обраних коефіцієнтів використання заземлювачів та стрічки, за формулою:

$$R_{зз.од} = \frac{R_{в.з}}{\eta_{cm}} \quad (A.9)$$

та

$$R_{зз.с.од} = \frac{R_{зз.}}{\eta_{cmp}}. \quad (A.10)$$

Отже, підставивши дані у формулу (A.9) та формулу (A.10), маємо:

$$R_{за.од.} = \frac{67,70}{0,42} = 161,2 \text{ Ом} \quad \text{та} \quad R_{з.с.од.} = \frac{8,5}{0,24} = 35,42 \text{ Ом.}$$

9. Визначаємо опір $R_{см}$ (вертикальних заземлювачів), з урахуванням паралельного з'єднання штучних заземлювачів $R_{шт.з.}$ та стрічки, тобто:

$$R_{з.смп.од.} = \frac{R_{см} \cdot R_{шт.з.}}{R_{см} + R_{шт.з.}},$$

звідки

$$R_{см} = \frac{R_{з.смп.од.} \cdot R_{шт.з.}}{R_{з.смп.од.} - R_{шт.з.}}. \quad (\text{A.11})$$

Підставляємо дані у формулу (A.11) і маємо:

$$R_{сс} = \frac{35,42 \cdot 5,33}{35,42 - 5,33} = 6,27$$

10. Визначаємо (уточнюємо) кількість вертикальних заземлювачів за формулою:

$$n = \frac{R_{заз.од.}}{R_{см}}. \quad (\text{A.12})$$

Згідно формули (A.12), отримаємо:

$$n = \frac{161,2}{6,27} = 25,7 \approx 26 \text{ шт.}$$

Тобто приймаємо кінцеву кількість вертикальних електродів $n = 26$ шт. Тоді схема розміщення вертикальних заземлювачів може прийняти вигляд, показаний на рис. А.2.

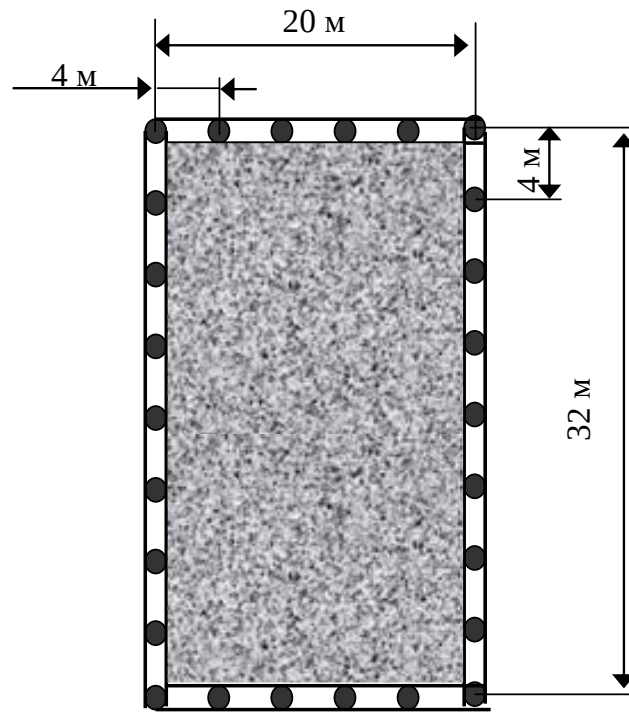


Рисунок А.2 – Схема розміщення вертикальних заземлювачів у ґрунті