

Міністерство освіти і науки України
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації,
робототехніки та програмування ім. П.М. Платонова

**Кафедра автоматизації технологічних, електромеханічних і
робототехнічних систем**



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

**на тему «МОДЕРНІЗАЦІЯ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНОВОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШНЕКОВОГО ДОЗАТОРА НА ХАРЧОВОМУ
ВИРОБНИЦТВІ З ПІДВИЩЕННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ»**

Здобувач СВО «Бакалавр»: Сторчеус Олександр Ігоревич
Студент групи АЕМ-40

Керівник: Москалюк Андрій Юрійович,
к.т.н., доцент

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від 16.06.2026 р., протокол № 8.

в.о. завідувач(ка) кафедри

АТЕіРС
(назва кафедри)

_____ (підпис)

Олексій Жигайло
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Одеса – 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування ім. П.М. Платонова

Кафедра автоматизації технологічних, електромеханічних і робототехнічних систем

Рівень ВО: перший

Ступень ВО: бакалавр

Галузь знань: 14 – Електрична інженерія

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма: Інтелектуально-керовані електромеханічні системи

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри ЕтаМ

Осадчук П.І.

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

здобувача СВО «Бакалавр» АЕМ – 40 Сторчеус Олександр Ігорович

1. Тема роботи: «Модернізація частотно-керованого електропривода шнекового дозатора на харчовому виробництві з підвищенням енергоефективності»

Керівник роботи: Москалюк Андрій Юрійович, к.т.н., доцент.

Затверджено наказом ОНТУ № 641-03 від 21.12.2025 р.

2. Строк подання студентом роботи: 15.06.2026 р.

3. Вхідні дані до проекту: шнековий дозатор сипких харчових матеріалів у складі технологічної лінії харчового виробництва, асинхронний електродвигун потужністю 1,1 кВт з частотним керуванням від перетворювача частоти. Необхідність забезпечення плавного пуску, регулювання продуктивності дозатора та підвищення енергоефективності електропривода.

4. Зміст розрахунково-конструкторської частини пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

аналіз процесів дозування сипких матеріалів у харчовому виробництві; властивості сипких харчових матеріалів та їх вплив на роботу шнекового дозатора; класифікація і конструктивні особливості шнекових дозаторів; аналіз способів регулювання продуктивності дозатора; розгляд принципів частотного керування асинхронним електродвигуном; вибір електродвигуна, перетворювача частоти та елементів силової частини; розрахунок продуктивності, потужності та моменту електропривода; розробка структурної схеми частотно-керованого електропривода; математична модель асинхронного електропривода; моделювання пускових режимів і режимів регулювання швидкості шнекового дозатора; економічне обґрунтування впровадження; охорона праці.

5. Перелік демонстраційного матеріалу. 1.Титульний лист. 2.Актуальність теми, об'єкт мета і завдання роботи. 3. Аналіз процесів дозування сипких матеріалів. 4. Конструктивні особливості шнекових дозаторів. 5. Способи регулювання продуктивності застосуванням

частотно-керованого електропривода. 6. Розрахунок і вибір асинхронного електродвигуна і перетворювача частоти. 7. Розрахунок продуктивності, потужності та моменту електропривода шнекового дозатора. 8. Модель частотно-керованого асинхронного електропривода. 9. Моделювання пускових режимів і режимів регулювання швидкості шнекового дозатора. 10. Економічне обґрунтування модернізації та питання охорони праці. 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Москалюк А.Ю., доц.		
Економічна частина	Москалюк А.Ю., доц.		

7. Дата видачі завдання: 15.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів	Прим
1	1. Загальна характеристика роботи: вибір об'єкта проектування, визначення актуальності теми, об'єкта, предмета, мети і завдань кваліфікаційної роботи	05.03.2026	
2	2. Аналіз шнекових дозаторів та процесів дозування сипких матеріалів: розгляд властивостей сипких харчових матеріалів, класифікації та конструктивних особливостей шнекових дозаторів, аналіз способів регулювання продуктивності та обґрунтування необхідності модернізації електропривода.	10.04.2026	
3	3. Теоретичні основи роботи шнекового дозатора з частотно-керованим електроприводом: розгляд принципу дії шнекового дозатора як об'єкта електропривода, залежності продуктивності від частоти обертання шнека.	10.05.2026	
4	4. Розрахунок та розробка частотно-керованого електропривода шнекового дозатора	25.05.2026	
5	5. Моделювання режимів роботи частотно-керованого електропривода: моделювання пускових режимів, дослідження режимів регулювання швидкості.		
6	5. Економічна частина: визначення капітальних вкладень у проєкт модернізації, економічне обґрунтування варіанта впровадження.	13.06.2026	
7	6. Охорона праці: організація охорони праці на виробництві, оцінка умов праці на робочому місці оператора шнекового дозатора.	15.06.2026	
7	Підготовка висновків, списку використаних джерел, Перевірка роботи на доброчинність. Рецензування роботи	19.06.2026	
8	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра.	23.06.2026	

Здобувач: Строчеус О.І. _____

Керівник: Москалюк А.Ю. _____

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ. Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач-дипломник _____ Строчеус О.І.

АНОТАЦІЯ

СТРОЧЕУС О.І. «МОДЕРНІЗАЦІЯ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШНЕКОВОГО ДОЗАТОРА НА ХАРЧОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ З ПІДВИЩЕННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ». Кваліфікаційна робота бакалавра. – Одеса: ОНТУ, 2026. – 96 с. Бібліогр.: 11 найм. Слайдів презентаційної частини – 18.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена модернізації частотно-керованого електропривода шнекового дозатора, що використовується у технологічних процесах харчового виробництва для дозування сипких матеріалів. У роботі розглянуто особливості роботи шнекових дозаторів, властивості сипких харчових матеріалів, способи регулювання продуктивності та обґрунтовано доцільність застосування частотно-керованого асинхронного електропривода.

Запропоноване технічне рішення дозволяє забезпечити плавний пуск електродвигуна, зменшити пускові струми, знизити динамічні навантаження на редуктор і шнековий робочий орган, а також регулювати продуктивність дозатора відповідно до технологічних потреб. В економічній частині обґрунтовано доцільність впровадження модернізованого електропривода, а в розділі охорони праці розглянуто заходи безпечної експлуатації обладнання.

Ключові слова: шнековий дозатор, сипкі матеріали, харчове виробництво, асинхронний електродвигун, перетворювач частоти, частотне керування, електропривод, енергоефективність.

ABSTRACT

STROCHEUS O. I. “MODERNIZATION OF A FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE OF A SCREW FEEDER IN FOOD PRODUCTION WITH IMPROVED ENERGY EFFICIENCY”. Bachelor’s Qualification Work. – Odesa: ONTU, 2026. – 96 p. Bibliography: 11 items. Presentation slides – 12.

The bachelor’s qualification work is devoted to the modernization of a frequency-controlled electric drive of a screw feeder used in food production technological processes for dosing bulk materials. The work considers the operating features of screw feeders, the properties of bulk food materials, methods of productivity control, and substantiates the feasibility of using a frequency-controlled induction electric drive.

The proposed technical solution makes it possible to ensure smooth motor starting, reduce starting currents, decrease dynamic loads on the gearbox and screw working element, and regulate feeder productivity according to technological requirements. The economic section substantiates the feasibility of implementing the modernized electric drive, while the occupational safety section considers measures for safe operation of the equipment.

Keywords: screw feeder, bulk materials, food production, induction motor, frequency converter, frequency control, electric drive, energy efficiency.

ЗМІСТ

	стр.
ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ ШНЕКОВИХ ДОЗАТОРІВ ТА ЧАСТОТНО-КЕРОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ У ХАРЧОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ	9
1.1 Загальна характеристика процесів дозування сипких матеріалів у харчовому виробництві	11
1.2 Дозування сипких харчових матеріалів.	14
1.3 Класифікація та конструктивні особливості шнекових дозаторів	16
1.4 Аналіз способів регулювання продуктивності шнекового дозатора	19
1.5 Обґрунтування необхідності модернізації частотно-керованого електропривода	22
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ШНЕКОВОГО ДОЗАТОРА З ЧАСТОТНО-КЕРОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ	25
2.1 Принцип дії шнекового дозатора як об'єкта електропривода	25
2.2 Залежність продуктивності дозатора від частоти обертання шнека	31
2.3 Механічні характеристики навантаження шнекового дозатора	36
2.4 Принципи частотного керування асинхронним електродвигуном.	37
2.5 Енергетичні показники роботи частотно-керованого електропривода	39
3 РОЗРАХУНОК ТА РОЗРОБКА ЧАСТОТНО-КЕРОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШНЕКОВОГО ДОЗАТОРА	42
3.1 Вибір електродвигуна шнекового дозатора	42
3.2 Вибір перетворювача частоти та елементів силової частини	46
3.3 Розрахунок продуктивності шнекового дозатора	49

50

					КРБ.АТЕРС.141.641-03.1.12			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Сторчеус О.І.			МОДЕРНІЗАЦІЯ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШНЕКОВОГО ДОЗАТОРА НА ХАРЧОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ З ПІДВИЩЕННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ»		Літ	Аркуш
Керівни		Москалюк А.Ю						Аркушів
Консульт.								
Зав.кафедри		Жигайло О.М.			ОНТУ, АЕМ - 40			

3.4 Розрахунок потужності та моменту електропривода	
4 МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШНЕКОВОГО ДОЗАТОРА	52
4.1 Розробка структурної схеми електропривода.	52
4.2 Математична модель асинхронного електропривода	58
4.3 Моделювання пускових режимів електропривода	55
4.4 Моделювання режимів регулювання швидкості шнекового дозатора	72
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	75
5.1 Капітальні вкладення у проект модернізації.	75
5.2 Розрахунок експлуатаційних витрат	70
5.3 Економічне обґрунтування варіанта впровадження	72
5.4 Розрахунок економічної вигоди від впровадження частотно-керованого електропривода	74
5.5 Супутні вигоди від реалізації запропонованого рішення	76
6 ОХОРОНА ПРАЦІ	78
6.1 Організація та управління охороною праці	78
6.2 Аналіз умов праці на робочому місці оператора шнекового дозатора.	84
6.3 Розрахунок захисного заземлення електроприводу.	85
6.4 Заходи з охорони праці під час експлуатації електропривода.	87
ВИСНОВКИ	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	91

ВСТУП

Сучасне харчове виробництво потребує стабільної, точної та енергоефективної роботи технологічного обладнання. Одним із важливих процесів є дозування сипких матеріалів, зокрема борошна, цукру, крохмалю, сухих сумішей та інших харчових компонентів. Для цього широко застосовують шнекові дозатори, продуктивність яких безпосередньо залежить від швидкості обертання шнека.

У традиційних системах електропривод шнекового дозатора часто працює з постійною швидкістю, що обмежує можливість гнучкого регулювання продуктивності. Крім того, прямий пуск асинхронного двигуна супроводжується підвищеними пусковими струмами та динамічними навантаженнями на редуктор, вал шнека і механічні вузли дозатора.

Застосування частотно-керованого електропривода дозволяє забезпечити плавний пуск, регулювання швидкості обертання шнека, зменшення пускових струмів і підвищення енергоефективності роботи обладнання. Завдяки цьому дозатор може працювати відповідно до фактичної технологічної потреби без надлишкового споживання електроенергії.

Актуальність теми полягає у необхідності модернізації електропривода шнекового дозатора на харчовому виробництві з метою підвищення енергоефективності, стабільності дозування та надійності роботи обладнання.

Об'єктом дослідження є електропривод шнекового дозатора сипких матеріалів на харчовому виробництві.

Предметом дослідження є частотно-керований асинхронний електропривод шнекового дозатора та режими його роботи.

Метою роботи є модернізація частотно-керованого електропривода шнекового дозатора на харчовому виробництві з підвищенням енергоефективності, забезпеченням плавного пуску та можливістю регулювання продуктивності дозатора.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

1 АНАЛІЗ ШНЕКОВИХ ДОЗАТОРІВ ТА ЧАСТОТНО-КЕРОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ У ХАРЧОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

1.1 Загальна характеристика процесів дозування сипких матеріалів у харчовому виробництві

Дозування сипких матеріалів є однією з основних технологічних операцій у харчовому виробництві, оскільки від точності подавання компонентів безпосередньо залежать якість готової продукції, стабільність рецептури, витрати сировини та енергетична ефективність обладнання. У більшості харчових технологій використовуються матеріали у вигляді порошків, гранул, круп, зерна, борошна, цукру, солі, крохмалю, спецій, харчових добавок, комбікормових сумішей та інших сипких продуктів. Їх необхідно подавати у заданій кількості, з певною швидкістю та з мінімальною похибкою.

Під дозуванням розуміють процес відмірювання певної кількості матеріалу за масою або об'ємом з подальшим подаванням його до наступної технологічної операції. У харчовій промисловості дозування може виконуватися під час приготування сумішей, фасування продукції, подавання сировини до змішувачів, екструдерів, млинів, сушильних апаратів, пакувальних машин та інших технологічних установок. У таких умовах дозатор виконує не лише функцію подавання матеріалу, але й функцію стабілізації технологічного процесу.

Особливістю харчового виробництва є необхідність забезпечення повторюваності рецептури. Навіть незначне відхилення кількості одного з компонентів може змінити фізико-хімічні властивості продукту, його смак, консистенцію, вологість, колір або термін зберігання. Тому до процесу дозування висувуються підвищені вимоги щодо точності, стабільності, санітарної безпеки, надійності та можливості оперативного регулювання продуктивності.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

У загальному вигляді процес дозування сипкого матеріалу включає такі етапи: завантаження матеріалу в бункер, формування потоку матеріалу, переміщення його робочим органом дозатора, вимірювання або контроль кількості матеріалу, регулювання подачі та передавання матеріалу до наступного технологічного обладнання. Структурно цей процес можна подати так: Бункер із сипким матеріалом → Формування потоку матеріалу → Робочий орган дозатора → (шнек, стрічка, вібраційний лоток тощо) → Регулювання продуктивності → Контроль маси або витрати → Подача матеріалу до технологічного обладнання



Рис. 1.1 Процес дозування сипкого матеріалу

Наведена на рисунку 1.2 інфографічна схема відображає повний технологічний цикл дозування сипких матеріалів у сучасному харчовому виробництві — від етапу надходження та зберігання сировини до формування готової суміші. На початковому етапі сировина подається у бункери або силоси, де здійснюється її накопичення та контроль рівня за допомогою відповідних датчиків. Далі матеріал транспортується до бункера-дозатора за допомогою шнекових або пневматичних транспортних систем, що забезпечують безперервність подачі.

Ключовим елементом є вузол дозування, який може реалізовуватися за ваговим або об’ємним принципом. У випадку вагового дозування

використовуються тензометричні датчики, що дозволяють точно визначати масу матеріалу, тоді як при об'ємному дозуванні продуктивність визначається геометричними параметрами робочого органу та швидкістю його обертання. Регулювання подачі здійснюється через зміну режимів роботи живильників, зокрема шнекових, які приводяться в дію електроприводами.

Управління процесом дозування виконується автоматизованою системою керування на базі програмованого логічного контролера (PLC), який обробляє сигнали від датчиків рівня, маси та швидкості і формує керуючі впливи на виконавчі механізми. Це забезпечує стабільність подачі матеріалу, точність дозування та узгоджену роботу всіх елементів технологічної лінії. Завершальним етапом є подавання дозованих компонентів до змішувача, де формується готова суміш із заданими характеристиками.

Таким чином, наведена схема ілюструє, що процес дозування є складною інтегрованою системою, в якій ключову роль відіграє електропривод дозуючого обладнання, а його модернізація, зокрема шляхом застосування частотного керування, є важливим напрямом підвищення енергоефективності та якості технологічного процесу.

За характером роботи дозування поділяється на періодичне та безперервне.

Періодичне дозування передбачає подавання окремих порцій матеріалу за заданим циклом. Такий спосіб характерний для фасувального обладнання, пакувальних машин, порційного приготування сумішей. Безперервне дозування забезпечує постійне подавання матеріалу з певною продуктивністю. Воно застосовується у потокових технологічних лініях, де необхідно підтримувати сталу витрату сировини.

У харчовому виробництві застосовують як об'ємне, так і масове дозування. Об'ємне дозування ґрунтується на відмірюванні певного об'єму матеріалу. Воно конструктивно простіше, але його точність залежить від насипної густини, вологості, ущільнення та гранулометричного складу матеріалу. Масове дозування забезпечує вищу точність, оскільки

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контролюється безпосередньо маса матеріалу. Однак такі системи складніші, дорожчі та потребують застосування датчиків ваги, тензометричних перетворювачів і контролерів. Основні види дозування сипких матеріалів у харчовому виробництві наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні види дозування сипких матеріалів

Ознака класифікації	Вид дозування	Характеристика	Приклад застосування
За способом відмірювання	Об'ємне	Відмірювання заданого об'єму матеріалу	Дозування круп, зерна, цукру
За способом відмірювання	Масове	Відмірювання заданої маси матеріалу	Фасування борошна, спецій, добавок
За режимом роботи	Періодичне	Подача матеріалу окремими порціями	Пакування, порційне змішування
За режимом роботи	Безперервне	Постійна подача матеріалу з заданою продуктивністю	Лінії змішування, екструзії, транспортування
За способом керування	Ручне	Регулювання виконує оператор	Просте допоміжне обладнання
За способом керування	Автоматизоване	Подача регулюється системою керування	Сучасні технологічні лінії
За робочим органом	Шнекове	Переміщення матеріалу гвинтовим робочим органом	Дозування борошна, порошків, гранул
За робочим органом	Вібраційне	Переміщення за рахунок коливань лотка	Дозування дрібних гранул
За робочим органом	Стрічкове	Подача матеріалу стрічкою	Безперервне дозування зерна, круп

З таблиці видно, що вибір способу дозування залежить від властивостей матеріалу, необхідної точності, продуктивності та місця дозатора у технологічній лінії. Для харчового виробництва особливо важливими є стабільність подачі, можливість санітарного очищення обладнання, відсутність надмірного руйнування частинок матеріалу та енергоефективність привода.

Сипкі харчові матеріали мають різні фізико-механічні властивості. Одні матеріали легко переміщуються самопливом, інші схильні до злежування, зависання в бункері, утворення склепінь або налипання на стінки. Наприклад,

цукор-пісок і крупи мають відносно добру плинність, а борошно, крохмаль або порошкові суміші можуть ущільнюватися, пилити та утворювати нерівномірний потік. Тому для забезпечення стабільного дозування необхідно враховувати насипну густину, вологість, розмір частинок, кут природного укосу, коефіцієнт внутрішнього тертя та здатність матеріалу до злежування. У технологічному процесі дозування важливим показником є продуктивність дозатора. Для безперервного процесу вона може визначатися як масова витрата матеріалу: $G = m / t$, де G — масова продуктивність дозатора, кг/с, m — маса поданого матеріалу, кг; t — час подавання матеріалу, с.

Для шнекових дозаторів продуктивність значною мірою залежить від частоти обертання шнека. Саме тому такі дозатори доцільно поєднувати з частотно-керованим електроприводом. Зміна частоти живлення асинхронного двигуна дозволяє плавно змінювати швидкість обертання шнека, а отже — продуктивність дозатора. Це є важливою перевагою порівняно з механічним регулюванням заслінками або періодичним вмиканням і вимиканням двигуна.

Частотно-керований електропривод дозволяє усунути ці недоліки. У такій системі продуктивність регулюється не за рахунок штучного опору потоку, а шляхом зміни швидкості робочого органу. Для шнекового дозатора це означає, що подача матеріалу змінюється безпосередньо через зміну частоти обертання шнека. У результаті зменшуються пускові струми, знижується механічне навантаження на редуктор і вал шнека, підвищується плавність пуску та зупинки, а також зменшується споживання електроенергії в режимах неповного навантаження.

Для харчового виробництва це має практичне значення. По-перше, плавне регулювання швидкості дає змогу точніше підтримувати рецептуру. По-друге, зменшення ударних навантажень підвищує надійність механічної частини дозатора. По-третє, зниження енергоспоживання зменшує експлуатаційні витрати підприємства. По-четверте, автоматизоване керування

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

частотно-керованим приводом дозволяє швидко переналаштовувати дозатор під різні матеріали та режими роботи.

У сучасних дозувальних системах дедалі частіше застосовуються датчики маси, датчики швидкості, контролери та перетворювачі частоти. Така система забезпечує зворотний зв'язок між фактичною кількістю поданого матеріалу та керуючим впливом на електропривод. Якщо фактична витрата відрізняється від заданої, контролер змінює частоту обертання двигуна, стабілізуючи процес дозування. Це особливо важливо для матеріалів зі змінними властивостями, наприклад при зміні вологості або насипної густини. Таким чином, процес дозування сипких матеріалів у харчовому виробництві є складною технологічною операцією, яка поєднує механічне переміщення матеріалу, контроль його кількості та керування електроприводом робочого органу. Найбільш перспективним напрямом удосконалення таких систем є застосування частотно-керованого електропривода шнекового дозатора, що дозволяє забезпечити плавне регулювання продуктивності, підвищити точність дозування, зменшити динамічні навантаження та підвищити енергоефективність обладнання.

1.2 Дозування сипких харчових матеріалів.

Сипкі харчові матеріали, що використовуються у технологічних процесах, характеризуються комплексом фізико-механічних властивостей, які визначають особливості їх транспортування та дозування. До таких матеріалів належать борошно, цукор, сіль, крупи, крохмаль, сухі суміші та інші продукти порошкоподібної або гранульованої структури. На відміну від рідин, вони мають змінну структуру потоку, що суттєво ускладнює процес їх точного дозування.

Однією з основних характеристик є насипна густина, яка визначає масу матеріалу в одиниці об'єму. Для процесу дозування це означає, що при сталому об'ємному потоці масова продуктивність змінюється пропорційно густині матеріалу. Масова продуктивність визначається як:

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

$$G = \rho \cdot Q \quad (1.1)$$

де G — масова продуктивність, кг/с; ρ — насипна густина, кг/м³; Q — об'ємна продуктивність, м³/с.

Для шнекових дозаторів об'ємна продуктивність залежить від ступеня заповнення та швидкості переміщення матеріалу:

$$Q = \varphi \cdot S \cdot v \quad (1.2)$$

де φ — коефіцієнт заповнення; S — площа поперечного перерізу, м²; v — швидкість руху матеріалу, м/с.

Швидкість переміщення матеріалу пов'язана з частотою обертання шнека:

$$v = k \cdot n \quad (1.3)$$

де k — конструктивний коефіцієнт; n — частота обертання, об/с.

З урахуванням цього масова продуктивність шнекового дозатора може бути записана як:

$$G = \rho \cdot \varphi \cdot S \cdot k \cdot n \quad (1.4)$$

Це співвідношення показує пряму залежність продуктивності від частоти обертання шнека, що є ключовим для застосування частотно-керованого електропривода. Частота обертання асинхронного двигуна визначається частотою живлення:

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (1.5)$$

де n_0 — синхронна частота обертання, об/хв; f — частота живлення, Гц; p — число пар полюсів.

З урахуванням ковзання фактична швидкість двигуна становить:

$$n = n_0(1 - s) \quad (1.6)$$

Таким чином, зміна частоти живлення через перетворювач частоти безпосередньо впливає на швидкість обертання шнека, а отже — і на продуктивність дозатора.

Окрім густини, важливим параметром є вологість матеріалу. Зі збільшенням вологості погіршується плинність, зростає злежуваність та ймовірність налипання матеріалу на стінки бункера і робочі органи. Це

призводить до нерівномірної подачі та збільшення навантаження на електропривод.

Кут природного укосу характеризує плинність матеріалу. Великі значення цього кута свідчать про низьку плинність і можливість утворення склепін у бункерах, що порушує стабільність подачі.

Коефіцієнти внутрішнього та зовнішнього тертя визначають опір руху матеріалу:

$$F = \mu \cdot N \quad (1.7)$$

де F — сила тертя; μ — коефіцієнт тертя; N — нормальна сила.

Зростання сил тертя призводить до збільшення крутного моменту на валу електродвигуна та підвищення енергоспоживання.

Таблиця 1.2 – Властивості сипких матеріалів у процесі дозування

Властивість	Вплив на процес дозування	Наслідки для електропривода
Насипна густина	Визначає масову продуктивність	Зміна навантаження
Вологість	Погіршує плинність, налипання	Зростання моменту
Гранулометричний склад	Нерівномірність потоку	Пульсації навантаження
Кут укосу	Утворення склепін	Переривчаста робота
Плинність	Стабільність подачі	Коливання режимів
Злежуваність	Зависання матеріалу	Перевантаження двигуна
Тертя	Опір руху	Зростання енергоспоживання

Таким чином, властивості сипких матеріалів безпосередньо визначають характер навантаження електропривода та стабільність процесу дозування. Застосування частотно-керованого електропривода дозволяє адаптувати швидкість обертання шнека до змінних умов роботи, що забезпечує підвищення точності дозування та зниження енергоспоживання.

1.3 Класифікація та конструктивні особливості шнекових дозаторів

Шнекові дозатори є одним із найбільш поширених типів обладнання для дозування сипких матеріалів у харчовому виробництві. Їх застосування

обумовлено простотою конструкції, можливістю забезпечення безперервної подачі матеріалу, відносно високою надійністю та зручністю інтеграції у автоматизовані технологічні лінії. Основним робочим органом такого дозатора є шнек — гвинтовий елемент, який при обертанні переміщує матеріал уздовж осі.

Загалом шнековий дозатор виконує дві функції: транспортування сипкого матеріалу та його дозування. При цьому точність дозування значною мірою залежить від стабільності заповнення міжвиткового простору шнека, що, у свою чергу, визначається властивостями матеріалу та режимом роботи електропривода.

Класифікація шнекових дозаторів. Класифікація шнекових дозаторів може здійснюватися за кількома основними ознаками: за конструкцією, принципом дії, способом дозування, типом привода та способом регулювання продуктивності.

За конструктивним виконанням шнекові дозатори поділяються на горизонтальні, вертикальні та похилі. Горизонтальні дозатори є найбільш поширеними і застосовуються для транспортування та дозування матеріалів на невеликі відстані. Вертикальні дозатори використовуються при необхідності підйому матеріалу, а похилі — у випадках, коли потрібно забезпечити компактне розміщення обладнання.

За принципом дії дозатори можуть бути безперервної та періодичної дії. У безперервному режимі забезпечується постійна подача матеріалу з певною продуктивністю, тоді як у періодичному режимі здійснюється подача окремих порцій із заданою масою або об'ємом.

За способом дозування виділяють об'ємні та масові шнекові дозатори. Об'ємні дозатори формують подачу за рахунок геометричних параметрів шнека і частоти його обертання. Масові дозатори додатково оснащуються ваговими системами, що забезпечують контроль маси матеріалу в реальному часі. За типом привода шнекові дозатори можуть оснащуватися

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

електроприводами постійної швидкості або частотно-керованими електроприводами. Останні є більш сучасними та забезпечують можливість плавного регулювання продуктивності. Основними конструктивними елементами шнекового дозатора є: бункер для завантаження матеріалу, шнек, корпус або труба, редуктор, електродвигун, опорні підшипники, система керування.

Об'єм матеріалу, що переміщується за один оберт шнека, можна оцінити як:

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S \quad (1.8)$$

де D — діаметр шнека, м; S — крок витка, м.

З урахуванням коефіцієнта заповнення об'ємна продуктивність становить:

$$Q = V_1 \cdot n \quad (1.9)$$

де n — частота обертання шнека, об/с; ϕ — коефіцієнт заповнення.

Масова продуктивність відповідно визначається як:

$$G = \rho \cdot V_1 \cdot n \quad (1.10)$$

Ці співвідношення показують, що продуктивність шнекового дозатора прямо залежить від частоти обертання шнека, що обґрунтовує доцільність застосування частотно-керованого електропривода.

Редуктор використовується для зниження швидкості обертання електродвигуна до значень, необхідних для роботи шнека, та для збільшення крутного моменту. Електродвигун є джерелом механічної енергії, а його вибір визначається необхідною потужністю та режимом роботи дозатора. Бункер призначений для накопичення матеріалу та забезпечення його рівномірного надходження до шнека. Шнек є основним робочим органом і визначає продуктивність дозатора. Його геометричні параметри — діаметр, крок витків, довжина — безпосередньо впливають на об'єм матеріалу, що переміщується за один оберт.

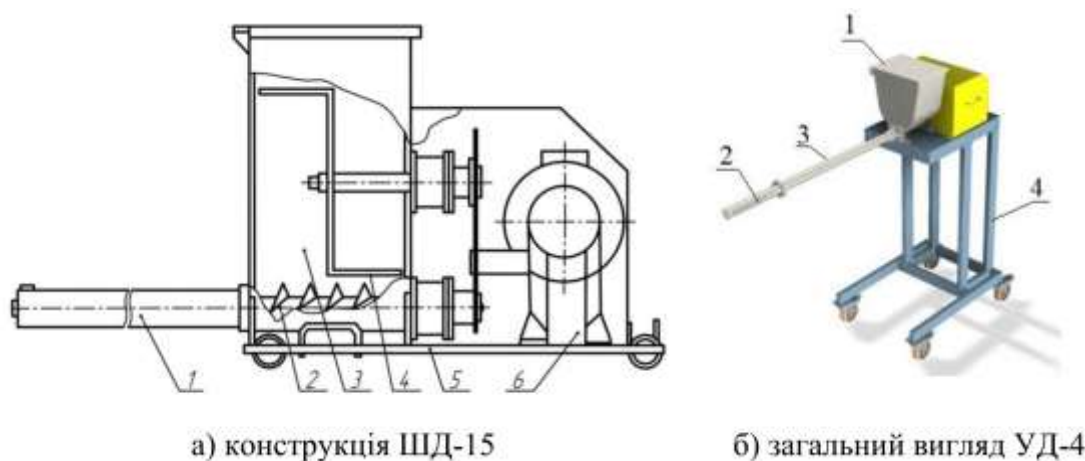


Рис. 1.4 Дозатор шнековий

ШД містить корпус 1 шнека 2, бункер 3, ворушилку 4, раму 5 і привод 6. Електродвигун має загальний привод з валами ворушилки 4 і шнека 2. За допомогою обертання ворущарки відбувається обвалення склепінь сипкого матеріалу [24]. Електродвигун має потужність 1,1 кВт, довжина кожуха шнека становить 500 мм, діаметр дозуючого робочого органу 150 мм, крок гвинтової лінії 80 мм. Робочий орган обертається зі швидкістю 6,5 ... 65 хв-1. Бункер розрахований на 48 дм³ завантаження. Дозатор має габаритні розміри 1110x520x480 мм, маса становить 70 кг.

Аналогічну конструкцію має дозатор типу УД-4, загальний вигляд якого представлений на рис. 1.3, б. Дозатор УД-4 - це шнековий дозатор безперервної дії для регульованої подачі порошкових матеріалів. Застосовується для подачі цукрової пудри в дражировочні барабани у виробництві екструдованих продуктів. Порошок з бункера 1, що обладнаний ворушилкою, подається шнеком 2 по циліндру 3, і відсипається через випускний отвір спеціальної конфігурації. Це забезпечує розподілене нанесення порошку на продукти, що покриваються. Дозатор виготовлений з корозійностійкої сталі. Регулювання подачі матеріалу виконується за допомогою частотного перетворювача. Для зручності регулярного технічного обслуговування дозатор закріплений на рамі 4, обладнаній колесами.

Таким чином, різноманітність конструкцій дозаторів обумовлена відмінностями у властивостях сипких матеріалів та вимогах до точності і продуктивності дозування. У харчовому виробництві найбільш поширеними є шнекові та вагові дозатори, які забезпечують оптимальне поєднання простоти конструкції, надійності та точності подачі матеріалу.

1.4 Аналіз способів регулювання продуктивності шнекового дозатора

Регулювання продуктивності шнекового дозатора може забезпечуватися зміною частоти обертання робочого органу, зміною умов завантаження матеріалу, регулюванням перерізу випускного отвору, періодичною роботою електропривода або комбінуванням декількох способів. Для шнекових дозаторів найбільш характерним є регулювання у зоні завантаження за допомогою шибєрної заслінки, а також регулювання частоти обертання шнека за допомогою електропривода.

Основна залежність продуктивності дозатора від параметрів подачі може бути подана через масову витрату матеріалу:

$$G = \rho \cdot Q \quad (1.11)$$

де G — масова продуктивність дозатора, кг/с; ρ — насипна густина матеріалу, кг/м³; Q — об'ємна продуктивність дозатора, м³/с.

Це означає, що зміна швидкості обертання шнека є найбільш прямим способом впливу на продуктивність дозатора. Саме тому у сучасних системах дозування доцільно застосовувати частотно-керований електропривод, який забезпечує плавне регулювання швидкості без значних механічних втрат.

У простих дозувальних установках застосовується циклічний режим роботи електропривода, коли двигун періодично вмикається та вимикається. У цьому випадку середня продуктивність залежить від співвідношення часу роботи і паузи:

$$G_{\text{ср}} = G_{\text{max}} \cdot \frac{t_{\text{вкл}}}{t_{\text{вкл}} + t_{\text{викл}}} \quad (1.13)$$

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

де G_{cp} — середня продуктивність дозатора, кг/с; G_{max} — максимальна продуктивність, кг/с; $t_{вкл}$ — час увімкнення електропривода, с; $t_{викл}$ — час паузи, с.

Такий спосіб простий за реалізацією, але супроводжується повторними пусками електродвигуна, підвищеними пусковими струмами та ударними навантаженнями на механічні елементи дозатора. Тому його застосування доцільне лише для малопотужних або допоміжних механізмів.

Регулювання шляхом зміни напруги живлення асинхронного двигуна використовується обмежено. Це пояснюється тим, що електромагнітний момент двигуна залежить від напруги за квадратичним законом $M = U^2$.

При зменшенні напруги момент двигуна різко знижується, а швидкість обертання змінюється незначно. Для шнекового дозатора це небажано, оскільки при збільшенні опору руху матеріалу можливе зупинення шнека або перегрів електродвигуна.

Найбільш ефективним способом регулювання продуктивності є частотне керування асинхронним електроприводом. У цьому випадку швидкість обертання двигуна визначається частотою живлення:

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (1.14)$$

де n_0 — синхронна частота обертання, об/хв; f — частота живлення, Гц; p — число пар полюсів.

З урахуванням ковзання фактична частота обертання ротора визначається як:

$$n = n_0(1 - s) \quad (1.15)$$

Таким чином, частотне керування дозволяє плавно змінювати подачу матеріалу без механічного обмеження потоку. Це зменшує втрати енергії, знижує динамічні навантаження, покращує умови пуску та зупинки, а також дає змогу адаптувати продуктивність дозатора до вимог технологічного процесу.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Для підвищення точності дозування може застосовуватися двоступеневе регулювання. На першому етапі шнек працює з підвищеною швидкістю, забезпечуючи швидке заповнення тари або подавання основної маси матеріалу. На другому етапі швидкість знижується, що дозволяє точніше довести дозу до заданого значення:

$$n_2 = k \cdot n_1 \quad (1.16)$$

де n_1 — частота обертання шнека на першому етапі; n_2 — частота обертання шнека на другому етапі; k — коефіцієнт зниження швидкості.

Порівняльна характеристика основних способів регулювання продуктивності шнекового дозатора наведена в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняння способів регулювання продуктивності шнекового дозатора

Спосіб регулювання	Сутність способу	Переваги	Недоліки
Шиберна заслінка	Зміна площі проходу матеріалу в зоні завантаження	Простота конструкції	Нерівномірне заповнення шнека, втрати енергії
Регулювання випускного отвору	Зміна перерізу потоку на виході	Простота реалізації	Можливе ущільнення матеріалу та зростання опору
Циклічне вмикання двигуна	Періодична робота електропривода	Просте керування	Пускові струми, ударні навантаження
Зміна напруги живлення	Зменшення моменту двигуна через зміну напруги	Простота силової частини	Низька ефективність, ризик перегріву
Частотне керування	Зміна швидкості шнека через зміну частоти живлення двигуна	Плавне регулювання, енергоефективність, зниження пускових струмів	Потребує перетворювача частоти
Двоступеневе дозування	Висока швидкість на початку і знижена швидкість наприкінці дозування	Поєднання продуктивності та точності	Складніший алгоритм керування
Замкнене керування за масою	Корекція швидкості за сигналом датчика маси	Висока точність дозування	Потребує датчиків і контролера

Дозатори будь-якого типу повинні забезпечувати видачу заданої кількості матеріалу з відхиленням, що не перевищує допустиму похибку. Крім того, вони повинні мати можливість регулювання продуктивності в заданому діапазоні, забезпечувати стабільність подачі, надійність роботи та можливість інтеграції у автоматизовану систему керування.

Таким чином, аналіз способів регулювання продуктивності показує, що механічні методи є простими, але мають обмежену точність та енергетичну ефективність. Найбільш раціональним для модернізованого шнекового дозатора є застосування частотно-керованого електропривода з можливістю двоступеневого або замкненого керування за масою. Це дозволяє забезпечити стабільну подачу сипкого матеріалу, підвищити точність дозування та знизити споживання електроенергії.

1.5 Обґрунтування необхідності модернізації частотно-керованого електропривода

Проведений аналіз процесів дозування сипких матеріалів у харчовому виробництві показав, що шнековий дозатор є складною електромеханічною системою, робота якої залежить від взаємодії декількох факторів: властивостей матеріалу, конструкції робочого органу, режиму завантаження, способу регулювання продуктивності та характеристик електропривода. У такій системі електропривод виконує не лише функцію обертання шнека, а й безпосередньо впливає на стабільність подачі, точність дозування, енергоспоживання та надійність обладнання.

Особливістю шнекового дозатора є те, що продуктивність визначається частотою обертання шнека та ступенем заповнення його міжвиткового простору. Якщо матеріал надходить до шнека рівномірно, то процес дозування має відносно стабільний характер. Проте у реальних умовах харчового виробництва властивості сипких матеріалів можуть змінюватися. Вологість, насипна густина, гранулометричний склад, плинність, злежуваність і

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коефіцієнт тертя впливають на опір переміщенню матеріалу. Через це навіть при незмінній швидкості обертання шнека фактична подача може відхилятися від заданої.

Ця особливість є важливою для харчового виробництва, оскільки порушення точності дозування впливає на якість готової продукції. Нерівномірна подача компонентів може змінювати рецептуру, погіршувати однорідність суміші, збільшувати витрати сировини та викликати нестабільність наступних технологічних операцій. Тому електропривод шнекового дозатора повинен забезпечувати не тільки обертання робочого органу, а й можливість гнучкої зміни режиму роботи відповідно до стану технологічного процесу.

Застосування частотно-керованого електропривода є більш ефективним порівняно з механічним регулюванням продуктивності за допомогою заслінок, шибєрів або періодичного вмикання і вимикання двигуна. Частотне керування дозволяє плавно змінювати швидкість обертання шнека, зменшувати пускові струми, знижувати ударні навантаження на механічні елементи дозатора та точніше налаштовувати продуктивність відповідно до потреб технологічної лінії.

Разом з тим наявність перетворювача частоти не завжди означає, що електропривод працює енергоефективно. У багатьох існуючих системах частота обертання задається оператором або контролером без урахування фактичного навантаження на валу двигуна та без контролю реальної масової витрати матеріалу. У такому випадку електропривод може працювати в режимах, які не відповідають фактичній потребі процесу: із завищеною швидкістю, при неповному завантаженні, при підвищеному опорі переміщенню матеріалу або при нестабільному надходженні продукту з бункера.

Особливо небезпечними є режими, пов'язані зі злежуванням або ущільненням матеріалу в зоні завантаження. У таких умовах збільшується опір

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

руху, зростає навантаження на шнек, редуктор і електродвигун. Якщо система керування не враховує ці зміни, можливі перевантаження електропривода, підвищення споживання електроенергії, зниження точності дозування та прискорене зношування механічних вузлів. Для безперервних харчових ліній це є суттєвим недоліком, оскільки відмова або нестабільна робота дозатора може зупинити весь технологічний процес.

Недостатньо ефективного керування електроприводом також впливає на тепловий режим двигуна. При роботі на малих частотах обертання погіршується охолодження асинхронного двигуна, особливо якщо використовується самовентиляція. У разі тривалої роботи з підвищеним моментом можливе збільшення температури обмоток, що негативно впливає на ресурс ізоляції та загальну надійність двигуна. Тому під час модернізації важливо враховувати не лише регулювання швидкості, а й енергетичні та теплові режими роботи електропривода.

Узагальнена схема причин, які обґрунтовують необхідність модернізації електропривода шнекового дозатора, наведена на рис. 1.5.



Рис. 1.5 Причини обґрунтування необхідності модернізації

Наведена схема показує, що першопричиною нестабільності роботи шнекового дозатора є не тільки конструкція механічної частини, а й змінний

характер технологічного навантаження. Якщо електропривод не адаптується до цих змін, виникають коливання продуктивності, зростають втрати електроенергії та погіршується якість дозування. Саме тому модернізація повинна бути спрямована на перехід від простого регулювання швидкості до більш раціонального керування роботою електропривода.

Практична доцільність модернізації полягає в тому, що частотно-керований електропривод може бути використаний не тільки як засіб регулювання швидкості, а й як елемент автоматизованої системи керування дозуванням. За наявності датчиків маси, швидкості або струму двигуна система може оцінювати фактичний стан процесу та коригувати режим роботи дозатора. Це дозволяє підтримувати необхідну подачу матеріалу при зміні його властивостей і зменшувати споживання електроенергії у режимах неповного навантаження.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ШНЕКОВОГО ДОЗАТОРА З ЧАСТОТНО-КЕРОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

2.1 Принцип дії шнекового дозатора як об'єкта електропривода.

Шнековий дозатор у складі електропривода розглядається як електромеханічна система, в якій електрична енергія перетворюється в механічну та використовується для переміщення сипкого матеріалу. У такій системі електродвигун, редуктор і шнек утворюють єдиний функціональний ланцюг, що забезпечує подачу матеріалу з заданою продуктивністю.

Принцип дії шнекового дозатора базується на використанні гвинтового робочого органу (шнека), який при обертанні переміщує сипкий матеріал уздовж своєї осі. Матеріал із завантажувального бункера потрапляє у міжвитковий простір шнека, захоплюється витками та транспортується до вихідного отвору. При цьому швидкість переміщення матеріалу визначається швидкістю обертання шнека, а об'єм подачі — геометричними параметрами робочого органу та ступенем його заповнення.

З позиції теорії електропривода шнековий дозатор є навантаженням з безперервним характером роботи та змінним моментом опору. Електродвигун створює обертовий момент, який через редуктор передається на вал шнека. Редуктор виконує функцію зниження швидкості обертання та збільшення крутного моменту до значень, необхідних для подолання опору руху сипкого матеріалу.

Структурно електропривод шнекового дозатора можна подати у вигляді послідовності елементів: джерело електроенергії — перетворювач частоти — асинхронний електродвигун — редуктор — шнек — сипкий матеріал.

Кожен із цих елементів впливає на загальні характеристики системи, зокрема на точність дозування, стабільність роботи та енергоефективність.

З точки зору електропривода важливим є те, що шнековий дозатор не є жорстко визначеним навантаженням. Його механічні характеристики залежать

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

від властивостей матеріалу, умов завантаження та режиму роботи. При зміні насипної густини, вологості або плинності матеріалу змінюється сила опору переміщенню, що призводить до зміни моменту навантаження на валу двигуна. Це означає, що електропривод працює в умовах змінного навантаження, що необхідно враховувати при побудові системи керування.

Як об'єкт електропривода шнековий дозатор характеризується такими основними властивостями:

- безперервний режим роботи;
- значна інерційність механічної частини;
- змінний момент навантаження;
- залежність навантаження від властивостей матеріалу;
- чутливість продуктивності до швидкості обертання;
- необхідність плавного регулювання режимів роботи.

У системах з частотно-керованим електроприводом керування здійснюється шляхом зміни частоти живлення асинхронного двигуна. Це дозволяє змінювати швидкість обертання шнека у широкому діапазоні без використання механічних регулюючих пристроїв. У результаті забезпечується більш точне дозування, зниження динамічних навантажень і покращення енергетичних показників роботи системи.

Разом з тим ефективність такого керування залежить від правильного врахування характеристик навантаження. Оскільки шнековий дозатор працює з матеріалами, властивості яких можуть змінюватися, система керування повинна бути здатною адаптуватися до цих змін. Це визначає необхідність застосування більш досконалих алгоритмів керування, ніж просте задання швидкості обертання.

Шнековий дозатор у складі електропривода являє собою електромеханічну систему, в якій електрична енергія перетворюється в механічну та використовується для переміщення сипкого матеріалу. Основним робочим органом дозатора є шнек, який здійснює транспортування

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

матеріалу вздовж осі при обертанні. На рисунку 2.1 наведено конструктивну схему шнекового дозатора, що дозволяє детально розглянути його будову.

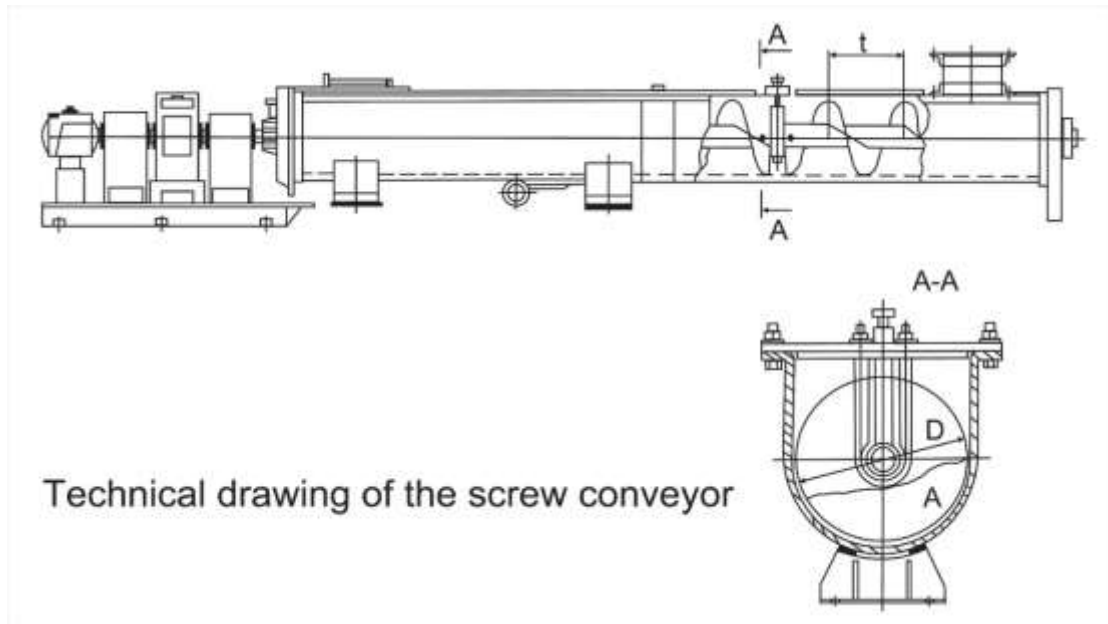


Рисунок 2.1 – Конструкція шнекового дозатора (гвинтового транспортера)

Як видно з рисунка 2.1, шнековий дозатор складається з таких основних елементів: електродвигуна, редуктора, приводного вала, шнека (гвинтового робочого органу), корпусу (труби або жолоба), опорних підшипників та завантажувального і розвантажувального патрубків.

Електродвигун через редуктор передає обертовий момент на вал шнека. Редуктор забезпечує зниження частоти обертання та збільшення крутного моменту до значень, необхідних для переміщення сипкого матеріалу. Шнек, закріплений на валу, обертається всередині корпусу та захоплює матеріал із зони завантаження.

З позиції електропривода важливою є передача енергії по ланцюгу: електродвигун → редуктор → вал → шнек → сипкий матеріал. На кожному етапі відбуваються втрати енергії та формуються навантаження, що визначають режим роботи електродвигуна. Основним параметром, який характеризує навантаження, є момент опору, що виникає внаслідок взаємодії шнека з матеріалом.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Особливістю шнекового дозатора як об'єкта електропривода є те, що момент навантаження не є сталим. Він залежить від:

- насипної густини матеріалу;
- вологості та плинності;
- ступеня заповнення шнека;
- геометричних параметрів шнека;
- умов завантаження та транспортування.

При збільшенні кількості матеріалу або погіршенні його плинності зростає опір переміщенню, що призводить до підвищення навантаження на електродвигун. У протилежному випадку (неповне заповнення) навантаження зменшується, але погіршується точність дозування.

Застосування частотно-керованого електропривода дозволяє реалізувати плавне регулювання швидкості обертання шнека, що є ключовим для керування продуктивністю дозатора. Крім того, частотне керування дає змогу зменшити пускові навантаження, підвищити точність дозування та покращити енергетичні показники системи.

Отже, шнековий дозатор як об'єкт електропривода характеризується складною взаємодією механічних і технологічних факторів, що обумовлює необхідність подальшого теоретичного аналізу залежності продуктивності від швидкості обертання шнека, який буде розглянуто у підрозділі 2.2.

2.2 Залежність продуктивності дозатора від частоти обертання шнека

Для шнекового дозатора однією з основних характеристик є залежність продуктивності від частоти обертання шнека. Саме ця залежність визначає принцип регулювання подачі сипкого матеріалу за допомогою частотно-керованого електропривода. У системах дозування зміна швидкості обертання шнека дозволяє плавно змінювати кількість матеріалу, що подається до технологічної лінії, без застосування механічних регулюючих пристроїв.

У теоретичному випадку при незмінних властивостях матеріалу та стабільному коефіцієнті заповнення залежність між продуктивністю та

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

частотою обертання має майже лінійний характер. Однак у реальних умовах експлуатації на характер цієї залежності впливають плинність матеріалу, нерівномірність надходження з бункера, вологість, ущільнення та зміна коефіцієнта тертя. У робочому діапазоні частот обертання продуктивність шнекового дозатора зростає практично пропорційно швидкості обертання шнека. Це пояснюється тим, що при збільшенні частоти обертання збільшується кількість матеріалу, що переміщується за одиницю часу.

Особливо важливим є те, що зі збільшенням швидкості обертання шнека зростає навантаження на електропривод. У результаті підвищуються струм двигуна, споживана потужність та теплове навантаження обмоток. Тому практичне регулювання повинно забезпечувати компроміс між продуктивністю, точністю дозування та енергоефективністю. Для оцінювання впливу частоти обертання на продуктивність у таблиці 2.1 наведено характерні режими роботи шнекового дозатора.

Таблиця 2.1 – Вплив частоти обертання шнека

Частота обертання шнека n , об/хв	Відносна продуктивність $G/G_{ном}$	Характер режиму роботи
10	0,2	Мала подача, високоточне дозування
20	0,4	Стабільна подача невеликих порцій
30	0,6	Середній режим навантаження
40	0,8	Робочий режим дозування
50	1,0	Номінальна продуктивність
60	1,2	Підвищена продуктивність
70	1,4	Зростання навантаження на привід
80	1,6	Можливе погіршення точності

З таблиці 2.1 видно, що збільшення частоти обертання шнека дозволяє підвищувати продуктивність дозатора у широкому діапазоні. Це є важливою

перевагою частотно-керованого електропривода, оскільки регулювання здійснюється без механічного перекриття потоку матеріалу.

При використанні механічних способів регулювання електродвигун часто продовжує працювати з майже сталою швидкістю, а продуктивність змінюється за рахунок створення додаткового опору потоку матеріалу. Такий підхід супроводжується втратами енергії та підвищеним механічним зношуванням. На відміну від цього, частотне керування забезпечує зміну продуктивності безпосередньо через зміну швидкості обертання робочого органу.

Крім енергетичних переваг, плавне регулювання швидкості дозволяє покращити динаміку роботи системи. Зменшуються ударні навантаження під час пуску та зупинки, знижується ймовірність перевантаження шнека та редуктора, а також покращується стабільність подачі сипкого матеріалу.

Таким чином, залежність продуктивності дозатора від частоти обертання шнека є основною теоретичною передумовою застосування частотно-керованого електропривода. Саме можливість плавної зміни швидкості обертання забезпечує ефективне регулювання продуктивності, підвищення точності дозування та покращення енергетичних характеристик роботи шнекового дозатора.

Крім того, застосування частотно-керованого електропривода створює можливість інтеграції дозатора до автоматизованої системи керування технологічним процесом. У цьому випадку швидкість обертання шнека може змінюватися залежно від сигналів датчиків маси, продуктивності або рівня матеріалу, що дозволяє підтримувати стабільний режим роботи навіть при зміні властивостей сипкого середовища.

2.3 Механічні характеристики навантаження шнекового дозатора

Механічні характеристики навантаження шнекового дозатора визначають умови роботи електропривода та впливають на вибір електродвигуна, редуктора, перетворювача частоти і способу керування. Для

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

електропривода шнековий дозатор є робочою машиною, яка створює момент опору на валу двигуна. Цей момент залежить від кількості матеріалу в робочій зоні шнека, його фізико-механічних властивостей, геометрії шнека, частоти обертання та умов завантаження.

У процесі роботи шнекового дозатора на харчовому виробництві діють кілька складових опору, які формують загальну механічну характеристику:

1. Опір, викликаний перемішуванням та транспортуванням продукту. Ця складова є результатом тертя матеріалу об внутрішню поверхню кожуха та між витками шнека. Для більшості сипучих продуктів цей момент є практично сталим і не залежить від частоти обертання шнека при постійній продуктивності.
2. Опір у вузлах тертя (підшипникових опорах, ущільненнях). Ця складова має лінійну залежність від швидкості обертання і зумовлена гідродинамічним або граничним тертям у підшипниках та сальниках.
3. Пусковий момент. Момент опору під час рушання з місця (особливо при повному завантаженні дозатора) суттєво перевищує номінальний робочий момент. Це пов'язано з необхідністю зсуву спресованого матеріалу в зоні завантажувальної горловини.

Для оцінювання режимів роботи частотно-керованого електропривода доцільно розглянути механічні характеристики шнекового дозатора та асинхронного електродвигуна у спільній системі координат. Графічно, це можна представити у вигляді залежностей моменту від частоти обертання, фактична механічна характеристика шнекового дозатора формується сумарною дією декількох складових моменту опору. Основною складовою є момент, пов'язаний із транспортуванням сипкого матеріалу, який у робочому діапазоні частот має переважно сталий характер. Додатково на загальне навантаження впливають втрати у вузлах тертя, які зростають зі збільшенням швидкості обертання шнека.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

На відміну від вентиляторів або насосів, для яких момент навантаження часто має чітко виражену квадратичну залежність від швидкості, шнековий дозатор має більш складний характер навантаження. Його момент опору значною мірою визначається силами тертя, ущільненням матеріалу, ступенем заповнення міжвиткового простору та опором переміщенню сипкого середовища.

У загальному вигляді момент навантаження шнекового дозатора можна подати як функцію технологічних і конструктивних параметрів:

$$M_n = f(\rho, \varphi, \mu, D, t, n) \quad (2.1)$$

де M_n — момент навантаження на валу шнека; ρ — насипна густина матеріалу; φ — коефіцієнт заповнення міжвиткового простору; μ — коефіцієнт тертя; D — діаметр шнека; t — крок шнека; n — частота обертання шнека.

Основним джерелом навантаження є опір переміщенню матеріалу вздовж корпусу дозатора. Цей опір виникає через тертя матеріалу об стінки корпусу, внутрішнє тертя між частинками, ущільнення матеріалу в зоні завантаження та механічну взаємодію матеріалу з витками шнека. Тому момент навантаження не є сталим, а змінюється залежно від режиму роботи дозатора.

Механічна потужність, необхідна для обертання шнека, визначається добутком моменту навантаження на кутову швидкість, а кутова швидкість пов'язана з частотою обертання шнека таким співвідношеннями:

$$P_m = M_n \cdot \omega = 2\pi n \quad (2.2)$$

де P_m — механічна потужність на валу шнека; M_n — момент навантаження; ω — кутова швидкість шнека, n — частота обертання шнека, об/с.

Ці залежності показують, що для забезпечення стабільної роботи дозатора електродвигун повинен розвивати момент, достатній для подолання опору руху матеріалу. Якщо момент двигуна менший за момент навантаження,

шнек не зможе стабільно переміщувати матеріал, що може призвести до зупинки, перевантаження або порушення точності дозування.

Для шнекового дозатора характерним є навантаження з переважанням статичної складової моменту. Це означає, що навіть при малих швидкостях обертання для початку руху необхідно подолати сили тертя та опір ущільненого матеріалу. Тому пусковий момент електродвигуна має бути достатнім для запуску шнека під навантаженням.

У спрощеному вигляді момент навантаження можна подати як суму статичної та динамічної складових:

$$M_{\text{н}} = M_{\text{ст}} + M_{\text{д}} \quad (2.3)$$

де $M_{\text{ст}}$ — статичний момент опору, пов'язаний із силами тертя та переміщенням матеріалу; $M_{\text{д}}$ — динамічна складова моменту, пов'язана з розгоном обертових мас і зміною режиму роботи.

Статична складова є основною під час сталого режиму роботи. Вона залежить від маси матеріалу, що знаходиться в робочій зоні шнека, коефіцієнта тертя та умов транспортування. Динамічна складова проявляється під час пуску, зупинки або зміни швидкості обертання.

Динамічний момент електропривода визначається через момент інерції та кутове прискорення:

$$M_{\text{д}} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (2.4)$$

де J — приведений момент інерції системи електропривода; $d\omega/dt$ — кутове прискорення.

Під час плавного пуску за допомогою перетворювача частоти динамічна складова моменту зменшується, оскільки швидкість обертання зростає поступово. Це знижує ударні навантаження на вал, редуктор, підшипники та шнек, що є важливою перевагою частотно-керованого електропривода.

Загальне рівняння руху електропривода шнекового дозатора можна записати у вигляді:

$$M_{\text{дв}} - M_{\text{н}} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (2.5)$$

У сталому режимі роботи швидкість обертання є сталою, тому кутове прискорення дорівнює нулю. У цьому випадку момент двигуна врівноважує момент навантаження: $M_{\text{дв}} = M_{\text{н}}$.

Це співвідношення є основною умовою сталого режиму роботи шнекового дозатора. Якщо властивості матеріалу змінюються, момент навантаження також змінюється, і система керування електроприводом повинна забезпечити відповідне регулювання моменту двигуна.

Для практичного аналізу навантаження шнекового дозатора доцільно виділити декілька характерних режимів. Перший режим — холостий хід. Другий режим — нормальна робота. Третій режим — перевантаження.

Механічна характеристика навантаження шнекового дозатора може бути подана як залежність моменту навантаження від частоти обертання.

Для орієнтовного опису такої характеристики можна використати залежність: $M_{\text{н}} = M_0 + k_{\text{м}} \cdot n$.

Ця залежність показує, що навіть при нульовій або малій швидкості обертання система має певний початковий момент опору. Це відрізняє шнековий дозатор від механізмів із вентиляторним характером навантаження, де момент істотно залежить від квадрата швидкості. Для наочності можна подати у вигляді таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Характерні режими навантаження шнекового дозатора

Режим роботи	Характер навантаження	Вплив на електропривод
Холостий хід	Невеликий момент опору, відсутність матеріалу або мінімальне заповнення	Мале споживання потужності, робота без технологічного навантаження
Нормальне дозування	Стабільне заповнення шнека, номінальний момент	Оптимальний режим роботи електропривода
Підвищене навантаження	Зростання густини, вологості або тертя матеріалу	Збільшення струму двигуна та споживаної потужності
Перевантаження	Злежування, заклинювання або надмірне заповнення	Ризик зупинки шнека, перегріву двигуна та спрацювання захисту
Перехідний режим	Пуск, зупинка або зміна швидкості	Виникнення динамічного моменту, потреба у плавному керуванні

З таблиці видно, що шнековий дозатор створює для електропривода змінне навантаження, яке залежить не тільки від швидкості обертання, а й від стану матеріалу. Тому, під час модернізації електропривода необхідно передбачити не лише регулювання частоти, а й контроль навантаження за струмом, моментом або продуктивністю.

2.4 Принципи частотного керування асинхронним електродвигуном.

У сучасних системах електропривода шнекових дозаторів найбільш ефективним способом регулювання швидкості є частотне керування асинхронним електродвигуном. Такий спосіб керування дозволяє плавно змінювати частоту обертання шнека, забезпечувати стабільну продуктивність дозування, знижувати пускові струми та покращувати енергетичні показники роботи електропривода. Асинхронні електродвигуни набули широкого поширення у промисловості завдяки простоті конструкції, високій надійності, відносно низькій вартості та добрим експлуатаційним характеристикам. Однак без застосування спеціальних засобів керування швидкість їх обертання практично визначається частотою мережі живлення і може змінюватися лише у незначних межах.

Для збереження перевантажувальної здатності двигуна та запобігання насиченню магнітної системи необхідно одночасно зі зміною частоти регулювати напругу живлення статора (U_1).

У сучасних електроприводах застосовують такі закони керування:

- скалярне керування;
- векторне керування;
- пряме керування моментом;
- адаптивне та інтелектуальне керування.

Найбільш поширеними для асинхронних електроприводів шнекових дозаторів є скалярне та векторне керування. Цей спосіб керування базується на підтриманні постійного співвідношення між напругою та частотою живлення асинхронного двигуна. Основною метою такого керування є

забезпечення приблизно сталого магнітного потоку двигуна при зміні швидкості обертання.

Скалярне керування є простим у реалізації та широко застосовується для насосів, вентиляторів, конвеєрів та шнекових дозаторів. Для таких механізмів не вимагається надвисока точність підтримання моменту, а головною задачею є плавне регулювання швидкості у заданому діапазоні.

Основною перевагою скалярного керування є простота налаштування та достатньо висока енергоефективність. Недоліком є зниження точності регулювання при малих швидкостях і погіршення динамічних характеристик при різких змінах навантаження.

Векторне керування (без датчика або з датчиком зворотного зв'язку) є більш складним способом регулювання, який дозволяє окремо керувати магнітним потоком та моментом асинхронного двигуна. У такій системі струм двигуна умовно розділяється на дві складові: одна створює магнітний потік, а інша — електромагнітний момент.

Електромагнітний момент двигуна визначається як:

$$M = k \cdot \Phi \cdot I \quad (2.6)$$

де M — момент двигуна; Φ — магнітний потік; I — струм ротора; k — конструктивний коефіцієнт.

Головною перевагою векторного керування є можливість отримання високого крутного моменту навіть при нульових або малих швидкостях обертання. Це особливо важливо для шнекових дозаторів, які працюють із сипкими матеріалами, що можуть створювати значний опір у момент пуску. Недоліком такого способу є складніша структура системи керування та вища вартість частотного перетворювача.

Пряме керування моментом (DTC). Цей метод базується на безпосередньому регулюванні електромагнітного моменту та магнітного потоку двигуна без використання проміжних контурів струму. Система аналізує стан двигуна у реальному часі та миттєво змінює режими роботи

інвертора. Перевагами прямого керування моментом є дуже швидка реакція електропривода, високий пусковий момент і точне керування у динамічних режимах.

Для асинхронних електроприводів застосовуються різні закони частотного керування, які відрізняються принципом формування моменту, точністю підтримання швидкості, складністю реалізації та сферою застосування. Вибір конкретного способу керування визначається характером навантаження, вимогами до точності регулювання, динамічними режимами роботи та економічною доцільністю використання системи електропривода.

Порівняльна характеристика основних законів керування асинхронними електроприводами наведена в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 Характеристика законів керування

Закон керування	Точність швидкості	Діапазон регулювання	Складність налаштування	Типове навантаження
Скалярний	Низька	1:10	Дуже просто	Насоси, вентилятори
Векторний	Висока	1:100 (1:1000)	Середня (потрібен автотюнінг)	Конвеєри, верстати
DTC	Дуже висока	1:100	Складна	Крани, тягові приводи

Як видно з таблиці 2.3, скалярне керування є найбільш простим та економічним способом регулювання швидкості асинхронного двигуна. Воно широко використовується для механізмів із плавним характером навантаження, зокрема насосів, вентиляторів і шнекових дозаторів. Основною перевагою такого способу є простота реалізації та налаштування.

Метод прямого керування моментом (DTC) характеризується найкращими динамічними показниками та швидкодією, однак має складнішу структуру керування та вищу вартість. Через це його застосування доцільне переважно для відповідальних електроприводів із високими вимогами до динаміки та точності.

Для шнекових дозаторів харчового виробництва найбільш раціональним є застосування скалярного або векторного частотного керування. Вибір конкретного способу залежить від продуктивності дозатора, характеру навантаження та вимог до точності регулювання подачі сипкого матеріалу.

2.5 Енергетичні показники роботи частотно-керованого електропривода

Енергетична ефективність — це одна з головних причин переходу на частотне керування. Завдяки оптимізації режимів роботи двигуна, частотно-керований електропривод (ЧКП) дозволяє досягти високих показників ККД та коефіцієнта потужності. Ось основні показники, які визначають енергетику такої системи: активна потужність; механічна потужність на валу; коефіцієнт корисної дії; коефіцієнт потужності; втрати енергії; питомі витрати електроенергії.

Енергетичні показники електропривода є одними з основних характеристик, що визначають ефективність роботи шнекового дозатора у складі технологічної лінії харчового виробництва. Від рівня споживання електроенергії залежать експлуатаційні витрати підприємства, тепловий режим роботи електрообладнання, ресурс електродвигуна та загальна економічність процесу дозування.

У системах шнекових дозаторів електропривод працює переважно у тривалому режимі з можливими змінами швидкості обертання та навантаження. Саме тому оцінювання енергетичних характеристик повинно враховувати як електричні параметри двигуна, так і механічні умови роботи шнека. Активна електрична потужність трифазного асинхронного двигуна визначається:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (2.7)$$

де P_1 — споживана активна потужність, Вт; U — лінійна напруга живлення, В; I — струм двигуна, А; $\cos\varphi$ — коефіцієнт потужності.

Для оцінювання енергетичних переваг частотно-керованого електропривода доцільно порівняти його характеристики з традиційним

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

способом прямого пуску асинхронного двигуна від мережі. Основні відмінності між цими системами наведені в таблиці 2.4.

Табл. 2.4 порівняння способів пуску

Показник	Прямий пуск від мережі	Частотний перетворювач
Пусковий струм	500–700% від номіналу	100–110% від номіналу
Енерговитрати при пуску	Високі (кидки)	Мінімальні (плавно)
cosφ мережі	Низький (потрібна компенсація)	Дуже високий (0.96+)
Регулювання втрат	Відсутнє	Оптимізація під навантаження

Для шнекових дозаторів особливе значення має режим часткового навантаження. У багатьох технологічних процесах дозатор не працює постійно з номінальною продуктивністю. При цьому електропривод може працювати на знижених швидкостях або при неповному заповненні шнека.

У традиційних системах із нерегульованим електроприводом це призводить до нераціонального використання електроенергії, оскільки двигун продовжує працювати з близькою до номінальної швидкістю навіть при зменшеній подачі матеріалу.

Застосування частотно-керованого електропривода дозволяє змінювати швидкість обертання шнека відповідно до фактичної потреби технологічного процесу. Це забезпечує зменшення споживаної потужності та підвищення енергоефективності системи.

Для оцінювання енерговитрат часто використовують питомі витрати електроенергії:

$$w = \frac{P_1}{G}, \quad (2.8)$$

де w — питомі витрати електроенергії, Вт·год/кг; G — продуктивність дозатора, кг/год.

Зменшення питомих витрат електроенергії є одним із головних критеріїв енергоефективності системи дозування. Важливим енергетичним показником є також коефіцієнт потужності двигуна:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S} \quad (2.9)$$

При роботі асинхронного двигуна з частотним перетворювачем коефіцієнт потужності зазвичай є вищим порівняно з нерегульованими системами, що позитивно впливає на режим роботи електричної мережі підприємства. Для наочного порівняння енергетичних характеристик регульованого та нерегульованого електропривода у таблиці 2.5 наведено основні особливості їх роботи.

Табл. 2.5 Порівняння енергетичних характеристик електроприводів

Показник	Нерегульований електропривод	Частотно-керований електропривод
Регулювання швидкості	Відсутнє	Плавне
Пусковий струм	Високий	Знижений
Робота при частковому навантаженні	Неефективна	Енергоефективна
Споживання електроенергії	Підвищене	Знижене
Динамічні навантаження	Значні	Зменшені
Точність дозування	Нижча	Вища
Можливість автоматизації	Обмежена	Широка

Як видно з таблиці 2.4, застосування частотно-керованого електропривода забезпечує суттєве покращення енергетичних характеристик

системи дозування. Особливо важливим є зниження споживання електроенергії у режимах неповного навантаження та при зміні продуктивності.

Для шнекових дозаторів значну роль відіграє плавний пуск електропривода. При прямому пуску асинхронного двигуна виникають значні пускові струми: $I_{\text{п}} \approx (5 \dots 7)I_{\text{ном}}$, де $I_{\text{п}}$ — пусковий струм; $I_{\text{ном}}$ — номінальний струм двигуна.

Частотний перетворювач забезпечує поступове збільшення частоти та напруги живлення двигуна, завдяки чому пускові струми значно зменшуються. Це дозволяє знизити навантаження на електромережу та механічні вузли дозатора.

Крім того, зменшення динамічних навантажень підвищує ресурс редуктора, підшипників, вала шнека та самого електродвигуна. Таким чином, енергетичні переваги частотного керування поєднуються з підвищенням експлуатаційної надійності системи.

Для сучасних автоматизованих ліній харчового виробництва важливою є також можливість оптимізації режимів роботи електропривода залежно від продуктивності дозатора. При зниженні подачі матеріалу система керування може автоматично зменшувати швидкість обертання шнека, що дозволяє уникнути перевитрати електроенергії.

Таким чином, енергетичні показники частотно-керованого електропривода визначають ефективність роботи шнекового дозатора та безпосередньо впливають на економічність технологічного процесу.

Проведений аналіз показав, що застосування частотного перетворювача дозволяє покращити енергетичні характеристики електропривода, зменшити пускові струми, знизити динамічні навантаження та підвищити точність дозування.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

3 РОЗРАХУНОК ТА РОЗРОБКА ЧАСТОТНО-КЕРОВАНОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШНЕКОВОГО ДОЗАТОРА

У сучасних системах дозування сипких матеріалів одним із головних елементів технологічного обладнання є електропривод шнекового дозатора. Саме електропривод забезпечує створення необхідного крутного моменту, підтримання заданої швидкості обертання шнека та стабільність процесу подачі матеріалу. Від правильності вибору параметрів електродвигуна та перетворювача частоти залежить енергоефективність, надійність і точність роботи всієї системи дозування.

3.1 Вибір електродвигуна шнекового дозатора

Одним із основних елементів частотно-керованого електропривода шнекового дозатора є асинхронний електродвигун. Саме електродвигун забезпечує створення необхідного крутного моменту для переміщення сипкого матеріалу вздовж осі шнека та визначає енергетичні й динамічні характеристики системи електропривода.

При виборі електродвигуна для шнекового дозатора необхідно враховувати: продуктивність дозатора, характер навантаження, необхідний пусковий момент, режим роботи; можливість частотного регулювання та енергоефективність привода.

Для шнекових дозаторів характерним є тривалий режим роботи зі змінним навантаженням, що обумовлено неоднорідністю сипкого матеріалу та зміною ступеня заповнення міжвиткового простору шнека. Крім того, у момент запуску електропривод повинен подолати значний пусковий момент, пов'язаний із зрушенням матеріалу в зоні завантаження.

У модернізованій системі електропривода приймається трифазний асинхронний електродвигун серії RA90S4, який працює у складі частотно-керованого електропривода. Асинхронні двигуни даного типу характеризуються простотою конструкції, високою надійністю, добрими пусковими властивостями та можливістю роботи з частотними перетворювачами. Каталожні технічні дані електродвигуна:

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Технічні характеристики електродвигуна RA90S4

- Типорозмір: RA90S4
- Синхронна частота обертання (n_0): 1500 об/хв
- Номінальна напруга ($U_{дв.н}$): 380 В
- Номінальна потужність ($P_{дв.н}$): 1,1 кВт
- Номінальне ковзання (S_H): 5,3 %
- Коефіцієнт потужності ($\cos\varphi_n$): 0,71
- ККД: 80,1 %
- Критичне ковзання (S_K): 32 %
- Момент інерції ротора ($J_{дв}$): 0,0034 кг·м²

Перед подальшими розрахунками визначимо синхронну кутову швидкість обертання двигуна:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3.14 \cdot 1500}{30} = 157.08 \text{ рад/с}$$

де $n_0=1500$ об/хв — синхронна частота обертання двигуна.

Номінальна кутова швидкість ротора визначається з урахуванням ковзання:

$$\omega_H = \left(1 - \frac{S_H}{100}\right) \cdot \omega_0 = \left(1 - \frac{5.3}{100}\right) \cdot 157.08 = 148.75 \text{ рад/с}$$

Отримані параметри свідчать про те, що обраний електродвигун забезпечує необхідний діапазон швидкостей для роботи шнекового дозатора та має достатній запас по пусковому моменту. Кратність пускового моменту $m_{п}=2.3$ дозвляє забезпечити надійний запуск шнека навіть при частковому заповненні дозатора сипким матеріалом.

Крім того, використання асинхронного двигуна у складі частотно-керованого електропривода дозволяє:

- плавно регулювати швидкість подачі матеріалу;
- зменшити пускові струми;
- знизити механічні навантаження;
- підвищити енергоефективність системи;
- забезпечити стабільну продуктивність дозування.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, для модернізованого шнекового дозатора доцільно використовувати трифазний асинхронний електродвигун серії RA90S4 потужністю 1,1 кВт, який забезпечує необхідні механічні та енергетичні характеристики електропривода при роботі з частотним перетворювачем.

Для перевірки правильності вибору електродвигуна необхідно визначити діапазон регулювання швидкості, приведений момент навантаження та необхідну потужність електропривода. Така перевірка дозволяє оцінити здатність електродвигуна забезпечувати стабільну роботу шнекового дозатора у всіх режимах експлуатації.

Визначимо необхідну максимальну швидкість електродвигуна з урахуванням передаточного числа редуктора:

$$n_{\text{дв.мах}} = n_{\text{мах}} \cdot i_{\text{ред}} = 400 \cdot 3.24 = 1296 \text{ об/хв}$$

де: $n_{\text{мах}}$ — максимальна швидкість обертання шнека; $i_{\text{ред}}$ — передаточне число редуктора.

Для визначення приведених до валу двигуна моментів навантаження використовується коефіцієнт:

$$a = b \frac{1 - \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{ред}}}{2 \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{ред}}} = \frac{1 - 0.85 \cdot 0.95}{2 \cdot 0.85 \cdot 0.95} = 0,107$$

Приведений максимальний статичний момент навантаження визначається:

$$M_{\text{с.прив.мах}} = (1 + a + b) \cdot \frac{M_{\text{прив.мах}}}{i_{\text{ред}}} = (1 + 0.107 + 0.107) \cdot \frac{15}{3.14} = 5.8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Отримані значення свідчать про те, що електропривод повинен забезпечувати стабільну роботу у широкому діапазоні моментів навантаження, які виникають під час транспортування сипкого матеріалу шнековим дозатором.

Номінальна потужність двигуна визначається:

$$P_{\text{дв.н}} = \frac{5.8 \cdot 148.75}{0.8 + (1 - 0.8) \cdot \frac{2 \cdot (0.418 \cdot 3.24)}{148.75}} = 1.080 \text{ кВт}$$

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Отримана розрахункова потужність становить 1.0801.0801.080 кВт, що практично відповідає номінальній потужності обраного електродвигуна 1.11 кВт. Отже, асинхронний електродвигун RA90S4 може бути прийнятий для привода шнекового дозатора. Використання цього двигуна у складі частотно-керованого електропривода дозволяє забезпечити плавний пуск, зменшити динамічні навантаження на редуктор і шнек, а також підтримувати необхідну швидкість обертання при зміні продуктивності дозатора. Це відповідає задачі модернізації електропривода з підвищенням енергоефективності.

3.2 Вибір перетворювача частоти та елементів силової частини

Після вибору асинхронного електродвигуна необхідно виконати вибір перетворювача частоти та основних елементів силової частини електропривода. Перетворювач частоти є основним силовим пристроєм модернізованої системи, оскільки саме він забезпечує плавне регулювання частоти та напруги живлення двигуна, а отже — зміну швидкості обертання шнека дозатора.

Для шнекового дозатора доцільно застосовувати частотно-керований електропривод зі скалярним законом керування. Такий спосіб керування є достатнім для механізмів із відносно плавним характером навантаження та не потребує складної системи зворотного зв'язку за швидкістю або моментом. Основною задачею перетворювача частоти в даній системі є забезпечення плавного пуску, регулювання продуктивності дозатора та зменшення пускових струмів.

Для модернізованого електропривода шнекового дозатора обираємо перетворювач частоти Schneider Electric Altivar 312 ATV312HU15N4. Даний перетворювач призначений для керування асинхронними електродвигунами невеликої потужності та дозволяє реалізувати плавний пуск, регулювання швидкості обертання і захист електропривода від перевантаження. Основні параметри вибраного перетворювача частоти наведено в таблиці 3.2.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Таблиця 3.2 – Параметри перетворювача частоти Schneider Electric

Параметр	Позначення	Значення
Тип перетворювача частоти	—	Schneider Electric Altivar 312 ATV312HU15N4
Максимальна потужність двигуна	($P_{ПЧ}$)	1,1 кВт
Номинальний струм	($I_{ПЧ}$)	3,4 А
Максимальний струм	($I_{ПЧ.max}$)	4,8 А
Номинальна напруга живлення	(U_c)	380...420 В
Спосіб керування	—	скалярне ($U/f=const$)
Частота ШІМ	($f_{ШІМ}$)	5000 Гц

Потужність перетворювача повинна бути не меншою за номінальну потужність обраного електродвигуна:

$$P_{ПЧ} \geq P_{дв.н} \quad (3.1)$$

Після підстановки: $1.1 \text{ кВт} \geq 1.1 \text{ кВт}$

Умова вибору за потужністю виконується, оскільки номінальна потужність перетворювача частоти відповідає потужності електродвигуна RA90S4.

Далі перевіримо відповідність перетворювача частоти за струмом. Номінальний струм перетворювача повинен бути більшим або рівним номінальному струму електродвигуна: $I_{ПЧ.н} \geq I_{дв.н}$, отже: $3.4 \text{ А} \geq 2.93 \text{ А}$

Умова вибору за номінальним струмом виконується. Для оцінювання запасу за струмом визначимо коефіцієнт запасу:

$$K_I = \frac{I_{ПЧ.н}}{I_{дв.н}} \quad (3.2)$$

Після підстановки: $K_I = 3.4 / 2.93 = 1.16$

Отримане значення показує, що перетворювач частоти має запас за номінальним струмом приблизно 16 %. Цього достатньо для роботи електропривода у тривалому режимі при номінальному навантаженні.

Отже, за максимальним струмом перетворювач частоти має запас приблизно 64 %. Це важливо для короткочасних перехідних режимів, коли під час пуску

або збільшення навантаження струм електродвигуна може тимчасово перевищувати номінальне значення.

З урахуванням широтно-імпульсної модуляції вихідної напруги інвертора приймаємо напругу живлення силового каналу $U_c = 380 \dots 420$ В.

Частота широтно-імпульсної модуляції приймається: $f_{\text{ШИМ}} = 5000$ Гц.

Період ШІМ визначається як обернена величина до частоти: $T_{\text{ШИМ}} = 1 / 5000 = 0,0002$ с.

Отриманий період ШІМ використовується при подальшому моделюванні роботи інвертора та електропривода. Вибір частоти ШІМ 5000 Гц дозволяє сформувати вихідну напругу з достатньо малою пульсаційною складовою, що зменшує пульсації електромагнітного моменту асинхронного двигуна.

Для визначення розрахункового струму фази силового каналу використаємо співвідношення:

$$I_{\text{рн}} = I_{\text{пч.н}} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}}}{U_c} = 3.4 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 220}{420} = 3.1 \text{ А}$$

За результатами розрахунку для силової лінії приймаємо такі параметри: $R_p = 0.45$ Ом та $L_p = 3 \cdot 10^{-3}$ Гн, де R_p — активний опір силової лінії; L_p — індуктивність силової лінії.

Отримані параметри силового каналу використовуються для подальшого опису та моделювання частотно-керованого електропривода. Активний опір R_p враховує втрати у силовому колі, індуктивність L_p — електромагнітну інерційність лінії, а ємність ССС — накопичення енергії в проміжній ланці постійного струму.

Узагальнений склад силової частини електропривода можна подати у вигляді такої послідовності: мережа живлення 380 В → автоматичний вимикач → перетворювач частоти → асинхронний електродвигун → редуктор → шнековий дозатор. Графічно, це можна відобразити на рис. 3.1

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 3.1 Склад силової частини електропривода

У такій структурі перетворювач частоти виконує функцію основного регулюючого силового пристрою. Він забезпечує плавне збільшення частоти під час пуску, обмеження струму двигуна, регулювання швидкості обертання шнека і захист електропривода від перевантаження.

Таким чином, для модернізованого електропривода шнекового дозатора обрано перетворювач частоти Schneider Electric Altivar 312 ATV312HU15N4 потужністю 1,1 кВт. Перевірка за потужністю та струмом показала, що вибраний перетворювач відповідає параметрам асинхронного електродвигуна RA90S4. Застосування частотного перетворювача дозволяє забезпечити плавний пуск, регулювання продуктивності дозатора, зменшення динамічних навантажень та підвищення енергоефективності електропривода.

3.3 Розрахунок продуктивності шнекового дозатора

Шнекові дозатори застосовуються для дозування добре сипких порошкоподібних, зернистих і дрібнодисперсних харчових матеріалів. До таких матеріалів можна віднести борошно, крупи, цукор, сіль, сухі суміші, гранульовані добавки та інші компоненти, які переміщуються під дією обертального руху шнека. Ефективність роботи дозатора значною мірою залежить від геометричних параметрів робочого органу, ступеня заповнення міжвиткового простору, насипної густини матеріалу та швидкості обертання шнека.

У частотно-керованому електроприводі продуктивність дозатора регулюється шляхом зміни частоти обертання електродвигуна. Через редуктор

ця зміна передається на шнек, у результаті чого змінюється кількість матеріалу, що переміщується за одиницю часу. Такий спосіб регулювання є більш ефективним порівняно з механічним обмеженням потоку, оскільки продуктивність змінюється без створення додаткового опору руху матеріалу.

Масову продуктивність шнекового дозатора можна визначити за формулою:

$$Q = 47.1[(D + 2\delta)^2 - d^2] \cdot S \cdot K \cdot \rho \cdot C \quad (3.3)$$

де Q — масова продуктивність шнекового дозатора, кг/год; ρ — насипна густина матеріалу, кг/м³; ω — кутова швидкість обертання шнека, рад/с; C — коефіцієнт, що враховує зниження продуктивності при нахилі шнека; K — коефіцієнт наповнення міжвиткового простору; δ — радіальний зазор між зовнішньою кромкою витка та внутрішньою поверхнею кожуха, м; D — зовнішній діаметр шнека, м; d — внутрішній діаметр шнека, м; S — крок шнека, м.

Для горизонтального розташування шнека приймається $C=1$.

Крок шнека приймається залежно від його зовнішнього діаметра: $S=0.8D$.

Основні геометричні параметри шнека дозатора показано на рис. 3.1.

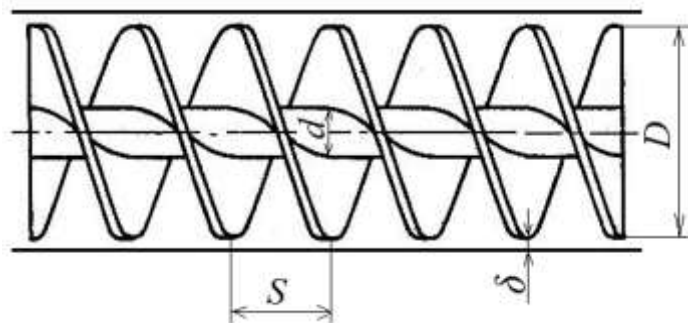


Рис. 3.2 Схема шнека гвинтового дозатора

На рисунку 3.1 позначено зовнішній діаметр шнека D , внутрішній діаметр d , крок шнека S та радіальний зазор δ . Саме ці параметри визначають об'єм матеріалу, який може бути переміщений за один оберт шнека. Чим більший діаметр і крок шнека, тим більшою є потенційна продуктивність дозатора. Водночас фактична продуктивність залежить також від коефіцієнта

наповнення та властивостей сипкого матеріалу. Для розрахунку приймаємо параметри шнекового дозатора, наведені у табл. 3.1.

Табл. 3.1 Параметри шнекового дозатора

Параметр	Позначення	Значення
Коефіцієнт наповнення	(K)	0.3
Зовнішній діаметр шнека	(D)	0.15 м
Внутрішній діаметр шнека	(d)	0.03 м
Крок шнека	(S)	0.12 м
Радіальний зазор	(Δ)	0.002 м
Коефіцієнт нахилу	(C)	1
Діапазон кутової швидкості	(ω)	0...7 рад/с
Діапазон насипної густини	(ρ)	0...2000 кг/м³

Після підстановки прийнятих геометричних параметрів у формулу продуктивності отримаємо розрахункову залежність продуктивності від насипної густини матеріалу та кутової швидкості обертання шнека:

$$Q = 47.1[(0.15 + 2 \cdot 0.002)^2 - 0.03^2] \cdot 0.12 \cdot 0.3 \cdot \rho \cdot 1 \cdot$$

$$Q = 47.1[(0.15 + 2 \cdot 0.002)^2 - 0.03^2] \cdot 0.12 \cdot 0.3 \cdot 1200 \cdot 1 \cdot 3 = 139.3 \text{ кг/год}$$

Для матеріалу з меншою насипною густиною, продуктивність буде визначена так:

$$Q = 47.1[(0.15 + 2 \cdot 0.002)^2 - 0.03^2] \cdot 0.12 \cdot 0.3 \cdot 200 \cdot 1 \cdot 3 = 23.2 \text{ кг/год}$$

Для зворотної задачі, за потребою, можна визначити необхідну швидкість обертання шнека за заданою продуктивністю. Наприклад, для забезпечення продуктивності $Q=232$ кг/год при насипній густині $\rho=1200$ кг/м³ необхідно встановити кутову швидкість приблизно 5 рад/с.

Результати розрахунку продуктивності для різних значень насипної густини та кутової швидкості доцільно подати у вигляді графічної залежності. Такий графік дозволяє оцінити вплив двох основних факторів — густини матеріалу та швидкості обертання шнека — на фактичну продуктивність дозатора.

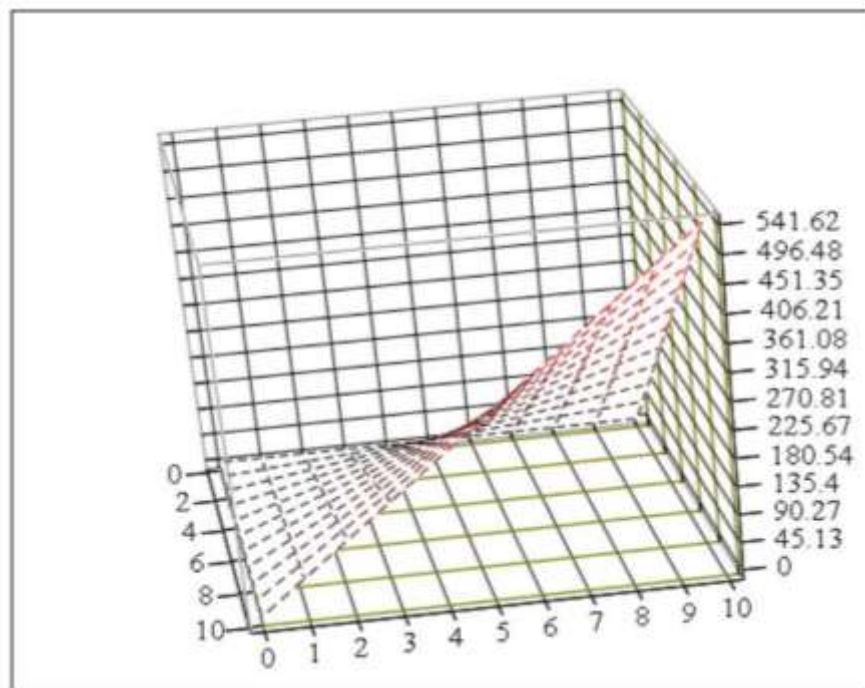


Рис. 3.3 Залежність продуктивності шнекового дозатора від кутової швидкості шнека та насипної густини матеріалу

Із графічної залежності видно, що продуктивність шнекового дозатора збільшується при зростанні кутової швидкості обертання шнека. При цьому за однакової швидкості обертання матеріал із більшою насипною густиною забезпечує більшу масову продуктивність. Отже, для стабільного дозування різних харчових матеріалів необхідно враховувати не лише швидкість обертання шнека, а й фізико-механічні властивості матеріалу.

Отримана залежність безпосередньо пов'язана з роботою частотно-керованого електропривода. Зміна частоти живлення асинхронного двигуна дозволяє плавно змінювати швидкість обертання шнека і, відповідно, продуктивність дозатора. Це дає змогу регулювати подачу матеріалу без застосування механічних заслінок або зміни конструкції робочого органу.

Таким чином, продуктивність шнекового дозатора визначається геометричними параметрами шнека, коефіцієнтом наповнення, насипною густиною матеріалу та кутовою швидкістю обертання. Для прийнятих параметрів дозатора при $\omega=3$ рад/с і $\rho=1200$ кг/м³ продуктивність становить 139.3 кг/год, а для отримання продуктивності 232 кг/год необхідно встановити

швидкість обертання приблизно $\omega=5$ рад/с. Це підтверджує доцільність використання частотно-керованого електропривода для плавного регулювання продуктивності шнекового дозатора.

3.4 Розрахунок потужності та моменту електропривода

Після визначення продуктивності шнекового дозатора необхідно виконати розрахунок потужності та моменту електропривода. Ці параметри є основними для перевірки правильності вибору асинхронного електродвигуна, перетворювача частоти та механічної передачі. Потужність електропривода визначає здатність системи забезпечувати необхідну подачу сипкого матеріалу, а момент — можливість подолання опору переміщенню матеріалу в корпусі дозатора.

Під час роботи шнекового дозатора електродвигун повинен забезпечувати обертання шнека з необхідною швидкістю та створювати момент, достатній для переміщення матеріалу вздовж осі робочого органу. Навантаження на електропривод залежить від продуктивності дозатора, довжини шнека, коефіцієнтів тертя, опору переміщенню матеріалу та загального ККД електропривода.

Потужність, необхідну для роботи електропривода шнекового дозатора, можна визначити за формулою:

$$P = \frac{Q \cdot g \cdot L \cdot k_1 \cdot k_2}{\eta} \quad (3.3)$$

де P — потужність електропривода, Вт; Q — продуктивність дозатора; g — прискорення вільного падіння, м/с²; L — довжина шнека, м; k_1 — коефіцієнт, що враховує втрати на тертя в підшипниках; k_2 — коефіцієнт опору переміщенню сипкого матеріалу в корпусі дозатора; η — ККД електропривода.

$$Q = \frac{250}{3600} = 0,069$$

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Для подальшого розрахунку приймаємо такі значення параметрів:

$$L=0.3 \text{ м}; k_1=1.1; k_2=1.5; \eta=0.9$$

Для продуктивності $Q=139.3 \text{ кг/год}$, яка відповідає режиму роботи при $\omega = \text{рад/с}$, $\rho=1200 \text{ кг/м}^3$, за графічною залежністю потужність електропривода становить $P=0.38 \text{ кВт}$

Для матеріалу з меншою насипною густиною $\rho=200 \text{ кг/м}^3$ при продуктивності $Q=23.2 \text{ кг/год}$ потужність електропривода становить $P=0.1 \text{ кВт}$

Результати розрахунку потужності доцільно подати у вигляді графічної залежності $P(Q)$, яка показує зміну необхідної потужності електропривода залежно від продуктивності шнекового дозатора.

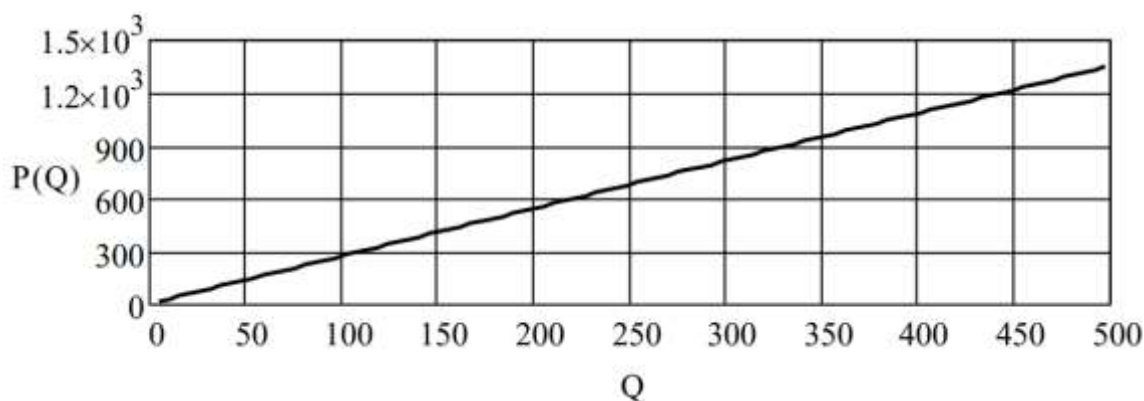


Рис. 3.4 Графічна залежність витрат електроенергії від продуктивності дозатора

Із графічної залежності видно, що зі збільшенням продуктивності дозатора зростає необхідна потужність електропривода. При цьому для прийнятих параметрів шнека та найбільшої насипної густини матеріалу потрібна потужність не перевищує номінальної потужності обраного електродвигуна. Це підтверджує правильність вибору асинхронного двигуна RA90S4 потужністю 1.1 кВт.

4 МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ШНЕКОВОГО ДОЗАТОРА

Моделювання режимів роботи частотно-керованого електропривода дає змогу оцінити характер зміни швидкості обертання, електромагнітного моменту, струму двигуна та продуктивності дозатора під час пуску, зміни частоти живлення і навантаження. Особливе значення має дослідження пускових режимів, оскільки саме в цей період у нерегульованих електроприводах виникають підвищені струми та механічні навантаження. Використання перетворювача частоти дозволяє сформувати плавний закон наростання швидкості, зменшити динамічні перевантаження та підвищити енергоефективність роботи системи.

4.1 Розробка структурної схеми електропривода.

Структурна схема електропривода є основою для подальшого математичного опису та комп'ютерного моделювання системи. Вона відображає взаємозв'язок між основними елементами електропривода, сигналами керування та вихідними координатами, які характеризують роботу шнекового дозатора. Для даної роботи структурна схема повинна показувати не тільки силову послідовність передавання енергії від мережі до робочого органу, а й логіку частотного керування асинхронним електродвигуном.

У модернізованій системі основним керуючим впливом є задана частота живлення, яка формується перетворювачем частоти відповідно до необхідної продуктивності дозатора. Зміна частоти приводить до зміни швидкості обертання асинхронного двигуна, яка через редуктор передається на вал шнека. У результаті змінюється кутова швидкість робочого органу і відповідно масова подача сипкого матеріалу: завдання частоти → перетворювач частоти → асинхронний двигун → редуктор → шнековий дозатор → продуктивність.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У даній роботі як основний спосіб керування приймається скалярне частотне керування. Воно базується на одночасній зміні частоти та напруги живлення асинхронного двигуна за заданим законом. Для шнекового дозатора такий спосіб є доцільним, оскільки механізм не потребує високоточного позиційного керування, а основною задачею є плавне регулювання швидкості обертання шнека та продуктивності подачі матеріалу. Закон скалярного керування має вигляд:

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} \quad (4.1)$$

де U_1 — напруга живлення статора асинхронного двигуна, В; f_1 — частота живлення двигуна, Гц.

При зменшенні частоти живлення перетворювач частоти відповідно знижує напругу, що дозволяє підтримувати магнітний потік двигуна на допустимому рівні. При збільшенні частоти підвищується швидкість обертання двигуна, а через редуктор — швидкість обертання шнека. У результаті змінюється продуктивність дозатора.

Узагальнена структурна схема частотно-керованого електропривода шнекового дозатора повинна містити такі основні блоки:

$$f^* \rightarrow U/f \rightarrow \text{ПЧ} \rightarrow \text{АД} \rightarrow \text{Редуктор} \rightarrow \text{Шнековий дозатор} \rightarrow Q$$

де f^* — задане значення частоти; U/f — блок формування закону скалярного керування; ПЧ — перетворювач частоти; АД — асинхронний електродвигун; Q — продуктивність шнекового дозатора.

У подальшому така схема використовується як основа для побудови моделі електропривода та дослідження його перехідних режимів. Основними координатами, які доцільно контролювати під час моделювання, є частота живлення, швидкість обертання двигуна, момент навантаження, струм двигуна та продуктивність шнекового дозатора.

Для побудови моделі частотно-керованого електропривода шнекового дозатора спочатку необхідно визначити функціональну структуру системи керування. У даній роботі приймається електропривод типу ПЧ–АД, у якому

перетворювач частоти формує напругу та частоту живлення статора асинхронного двигуна відповідно до заданого закону скалярного керування. Такий підхід є достатнім для шнекового дозатора, оскільки основною задачею системи є плавне регулювання швидкості обертання шнека, а не високоточне позиційне керування. Функціональна схема частотно-керованого електропривода зі скалярним керуванням наведена на рисунку 4.1.

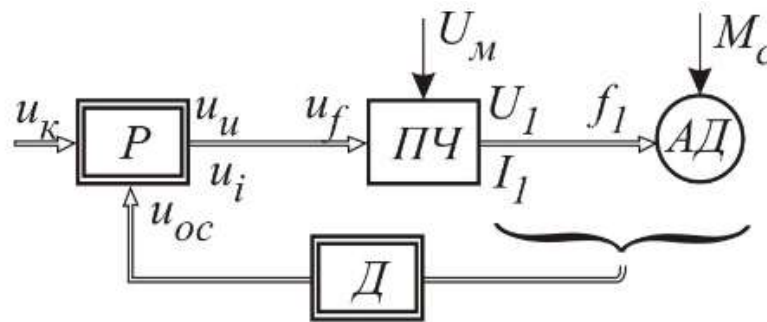


Рис. 4.1 - Функціональна схема замкненої системи ПЧ-АД зі скалярним керуванням

На рисунку 4.1 позначено: Р — регулятор системи керування; ПЧ — перетворювач частоти; АД — асинхронний електродвигун; Д — давачі змінних електропривода. Вхідним сигналом системи є керуючий сигнал u_k , який надходить на регулятор. На виході регулятора формується сигнал керування перетворювачем частоти, що визначає необхідні значення частоти f_1 та напруги U_1 живлення асинхронного двигуна.

Перетворювач частоти забезпечує зміну параметрів електричної енергії, що подається на статор двигуна. У системі скалярного керування зміна напруги та частоти виконується узгоджено, за законом $U_1/f_1 = \text{const}$. Завдяки цьому підтримується необхідний магнітний потік двигуна та забезпечується стійка робота електропривода в заданому діапазоні швидкостей.

На вал асинхронного двигуна діє статичний момент навантаження M_c , який у шнековому дозаторі створюється опором переміщенню сипкого матеріалу, тертям у робочій зоні шнека та втратами в механічній передачі. Давачі змінних електропривода формують сигнали зворотного зв'язку, які

можуть використовуватися для контролю струму, швидкості, напруги або інших координат системи.

Для шнекового дозатора вихідною технологічною координатою є продуктивність Q , яка залежить від швидкості обертання шнека. Тому в подальшому функціональна схема ПЧ–АД доповнюється механічною частиною: редуктором і шнековим робочим органом. У такому вигляді модель дозволяє досліджувати, як зміна частоти живлення двигуна впливає на швидкість шнека, момент навантаження та продуктивність дозування сипкого матеріалу.

4.2 Математична модель асинхронного електропривода

Математична модель необхідна для подальшого дослідження пускових режимів, зміни швидкості обертання та впливу навантаження шнекового дозатора на роботу електродвигуна. На відміну від структурної схеми, яка показує загальний склад системи, математична модель дозволяє кількісно описати взаємозв'язок між напругою живлення, частотою, струмами, електромагнітним моментом, швидкістю обертання та моментом навантаження.

Для математичного опису асинхронного електропривода шнекового дозатора використовується Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна. Така схема дозволяє врахувати активні та індуктивні опори обмоток статора і ротора, контур намагнічування, ковзання ротора та струми, які визначають електромагнітний момент двигуна. Т-подібна схема заміщення є зручною для інженерного аналізу, оскільки дозволяє перейти від паспортних даних електродвигуна до параметрів, необхідних для побудови механічних та електромеханічних характеристик. У подальшому ці параметри використовуються для моделювання пускових режимів і режимів регулювання швидкості частотно-керованого електропривода.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

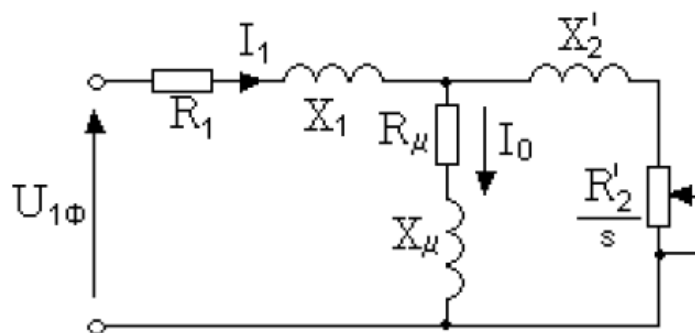


Рис. 4.2 Схема заміщення асинхронного двигуна

На рисунку 4.2 позначено: R_1 — активний опір обмотки статора; X_1 — індуктивний опір розсіювання статора; R_2' — активний опір ротора, приведений до обмотки статора; X_2' — індуктивний опір ротора, приведений до статора; R_μ — параметри контуру намагнічування; s — ковзання асинхронного двигуна; I_1 — струм статора; I_0 — струм намагнічування.

Для розрахунку приймаються паспортні дані асинхронного електродвигуна з таблиці 4.1.

Табл.4.1 – Паспортні дані асинхронного двигуна ML90S4

Параметр	Значення
Висота осі обертання, h	90 мм
Номінальна потужність, P_H	1.1 кВт
Синхронна частота обертання, n_0	1500 об/хв
Номінальна частота обертання, n_H	1420 об/хв
Коефіцієнт корисної дії	80.1 %
Коефіцієнт потужності	0.71
Кратність пускового струму, $I_{\text{пуск}}$	5.5
Кратність пускового моменту, $M_{\text{пуск}}$	2.3
Кратність максимального моменту	2.6
Момент інерції ротора, J	0.0034 кг·м ²

Номінальний струм двигуна визначається за паспортними даними двигуна:

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_H} = \frac{1.1 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.71 \cdot 0.8} = 2.93 \text{ А}$$

де P_H — номінальна потужність двигуна; U_1 — номінальна фазна напруга; $\cos \varphi$ — коефіцієнт потужності; η_H — коефіцієнт корисної дії двигуна.

Для моделювання роботи електропривода важливо враховувати також режим часткового навантаження, оскільки шнековий дозатор не завжди працює з максимальною продуктивністю. Струм статора при частковому навантаженні визначається:

$$I_{11} = \frac{p_{\text{ж}} \cdot P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{p_{\text{ж}}} \cdot \eta_{p_{\text{ж}}}} = \frac{0.75 \cdot 1.1 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.63 \cdot 0.8} = 2.47 \text{ A}$$

Коефіцієнт потужності при частковому навантаженні визначається через коефіцієнт, що залежить від потужності двигуна: $\cos \varphi_{p_{\text{ж}}} = 0.71 \cdot 0.986 = 0.63$, K — коефіцієнт, що залежить від потужності двигуна; $\cos \varphi_{p_{\text{ж}}}$ — коефіцієнт потужності при частковому навантаженні; $\eta_{p_{\text{ж}}}$ — ККД при частковому навантаженні, який у розрахунку приймається близьким до номінального значення.

Струм намагнічування двигуна визначається з урахуванням номінального струму, струму при частковому навантаженні та номінального ковзання:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(p_{\text{ж}} \cdot I_{1H} \cdot \frac{1-s_H}{1-p_{\text{ж}} \cdot s_H} \right)^2}{1 - \left(p_{\text{ж}} \cdot \frac{1-s_H}{1-p_{\text{ж}} \cdot s_H} \right)^2}} \quad (4.2)$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{2.47^2 - \left(0.75 \cdot 2.93 \cdot \frac{1-0.053}{1-0.75 \cdot 0.053} \right)^2}{1 - \left(0.75 \cdot \frac{1-0.053}{1-0.75 \cdot 0.053} \right)^2}} = 1.77 \text{ A}$$

Критичне ковзання двигуна визначається так:

$$s_k = s_H \cdot \frac{k_{\text{max}} + \sqrt{k_{\text{max}}^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\text{max}} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\text{max}} - 1)} \quad (4.3)$$

$$s_k = 0.053 \cdot \frac{2.6 + \sqrt{2.6^2 - [1 - 2 \cdot 0.053 \cdot 1 \cdot (2.6 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0.053 \cdot 1 \cdot (2.6 - 1)} = 0.32$$

де $k_{\text{max}}=2.6$ — кратність максимального моменту; $\beta=1$ — розрахунковий коефіцієнт.

Для подальшого визначення параметрів схеми заміщення використовується коефіцієнт $C1$:

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{1.77}{2 \cdot 5.5 \cdot 2.93} = 1.055$$

Отримані значення $I_{1H}=2.93$ А, $I_{11}=2.47$ А, $I_0=1.77$ А, $s_k=0.32$ та $C_1=1.055$ є початковими параметрами для подальшого визначення активних та індуктивних опорів Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна. У подальшому ці параметри використовуються для побудови механічної характеристики, визначення електромагнітного моменту та моделювання пускових режимів частотно-керованого електропривода шнекового дозатора.

Після визначення коефіцієнта C_1 , критичного ковзання та струму намагнічування можна перейти до розрахунку параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна. Для цього спочатку визначається допоміжний коефіцієнт A_1 , який використовується при подальшому розрахунку активного опору ротора, приведенного до обмотки статора.

$$A_1 = m \cdot U_{1H}^2 \cdot \frac{1-s_H}{2 \cdot C_1 \cdot k_{max} \cdot P_H} \quad (4.4)$$

$$A_1 = 3 \cdot 220^2 \cdot \frac{1 - 0.053}{2 \cdot 1.055 \cdot 2.6 \cdot 1100} = 22.787$$

де $m=3$ — кількість фаз двигуна; $U_{1H}=220$ В — номінальна фазна напруга; $s_H=0.053$ — номінальне ковзання; $C_1=1.055$ — розрахунковий коефіцієнт; $k_{max}=2.6$ — кратність максимального моменту; $P_H=1100$ Вт — номінальна потужність двигуна.

Для визначення індуктивного опору короткого замикання вводиться допоміжний коефіцієнт γ . Він залежить від критичного ковзання та використовується при подальшому розрахунку реактивної складової схеми заміщення.

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k}\right)^2 - \beta^2} \sqrt{\left(\frac{1}{0.32}\right)^2 - 0.75^2} = 2.947$$

Далі визначається активний опір ротора, приведений до обмотки статора. Цей параметр є одним із основних у Т-подібній схемі заміщення,

оскільки він визначає втрати у роторному колі та впливає на форму механічної характеристики двигуна.

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k}\right) \cdot C_1} = 5,253 \text{ Ом}$$

Після визначення активного опору ротора можна знайти активний опір обмотки статора. У розрахунковій моделі цей параметр враховує втрати потужності у статорній обмотці двигуна.

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' = 1.055 \cdot 5.253 = 5.542 \text{ Ом}$$

Наступним етапом визначається індуктивний опір короткого замикання. Він характеризує сумарний індуктивний опір розсіювання статора і ротора та суттєво впливає на пусковий струм і критичний момент двигуна.

$$X_{K3} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 2.947 \cdot 1.055 \cdot 5.253 = 16.33 \text{ Ом}$$

Після визначення сумарного індуктивного опору короткого замикання його розподіляють між статорною та роторною обмотками. Спочатку визначається індуктивний опір роторної обмотки, приведеної до статора.

$$X_{2H}' = 0.58 \cdot \frac{X_{K3}}{C_1} = 0.58 \cdot \frac{16.33}{1.055} = 8.987 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір статорної обмотки визначається як частина індуктивного опору короткого замикання:

$$X_{1H} = 0.42 \cdot X_{K3} = 0.42 \cdot 16.33 = 6.859 \text{ Ом}$$

Для перевірки правильності розрахованих параметрів визначимо критичне ковзання за знайденими значеннями C_1 , R_2' , R_1 та X_K . Якщо отримане значення збігається з раніше прийнятим критичним ковзанням, то параметри схеми заміщення визначені коректно.

$$s_{k1} = \frac{C_1 \cdot R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{K3}^2}} = \frac{1.055 \cdot 5.253}{\sqrt{5.542^2 + 16.33^2}} = 0.32$$

Отримане значення $s_{k1}=0.32$ збігається з раніше визначеним критичним ковзанням $s_k=0.32$. Це підтверджує правильність прийнятих параметрів Т-подібної схеми заміщення.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Для подальшого розрахунку контуру намагнічування необхідно визначити ЕРС вітки намагнічування. Вона залежить від фазної напруги, коефіцієнта потужності, активного опору статора, індуктивного опору статора та номінального струму двигуна.

$$E_1 = \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos \varphi - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1H} \cdot \sin \varphi - X_{1H} \cdot I_{1H})^2}$$

$$E_1 = \sqrt{(220 \cdot 0.71 - 5.542 \cdot 2.93)^2 + (220 \cdot 0.704 - 6.859 \cdot 2.93)^2}$$

$$= 194.34 \text{ В}$$

Отримані значення активних та індуктивних опорів дозволяють сформувати повну розрахункову Т-подібну схему заміщення асинхронного двигуна. Ця схема використовується для визначення струмів, електромагнітного моменту та побудови механічної характеристики двигуна, що є необхідним для подальшого моделювання пускових режимів частотно-керованого електропривода шнекового дозатора.

Після визначення ЕРС вітки намагнічування можна розрахувати індуктивний опір контуру намагнічування. Цей параметр характеризує здатність двигуна створювати основний магнітний потік і є важливим елементом Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна.

$$X_{\mu H} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{194.334}{1.77} = 109.726 \text{ Ом}$$

де $X_{\mu H}$ — індуктивний опір контуру намагнічування; E_1 — ЕРС вітки намагнічування; I_0 — струм намагнічування двигуна.

Отримане значення $X_{\mu H} = 109.726 \text{ Ом}$ дозволяє завершити формування основних параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна. Надалі ці параметри використовуються для розрахунку механічної характеристики двигуна, яка показує залежність електромагнітного моменту від кутової швидкості обертання.

Для побудови природної механічної характеристики спочатку визначається синхронна кутова швидкість обертання магнітного поля двигуна. Вона залежить від частоти мережі живлення та кількості пар полюсів двигуна.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{2} = 157.08 \text{ рад/с}$$

Синхронна кутова швидкість є граничною швидкістю обертання магнітного поля статора. Реальна швидкість ротора асинхронного двигуна завжди дещо менша за синхронну через наявність ковзання. Саме ковзання визначає електромагнітну взаємодію між полем статора та ротором.

Номінальна кутова швидкість двигуна визначається з урахуванням номінального ковзання:

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - s_H) = 157.08 \cdot (1 - 0.053) = 148.75 \text{ рад/с}$$

Отримане значення номінальної кутової швидкості відповідає робочій зоні асинхронного двигуна при номінальному навантаженні. Для шнекового дозатора це важливо, оскільки швидкість двигуна через редуктор визначає швидкість обертання шнека та продуктивність подачі матеріалу.

Природна механічна характеристика асинхронного двигуна описується залежністю електромагнітного моменту від ковзання або кутової швидкості. Для двигуна, представленого Т-подібною схемою заміщення, електромагнітний момент можна визначити за виразом:

$$M(s) = \frac{m \cdot U_{1H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{K3}^2 \right]} \quad (4.5)$$

Оскільки під час моделювання зручно аналізувати залежність моменту від швидкості, у формулі моменту ковзання можна виразити через кутову швидкість ротора:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad (4.6)$$

Ця залежність дозволяє визначити, який момент може розвивати двигун при різних швидкостях обертання. Для електропривода шнекового дозатора механічна характеристика є необхідною для оцінки пускового режиму, перевірки запасу моменту та визначення стійкості роботи при зміні навантаження. Номінальний момент двигуна визначається через номінальну потужність і номінальну кутову швидкість:

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{1.1 \cdot 10^3}{148.75} = 7.4 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Номінальний момент $M_H=7.4 \text{ Н}\cdot\text{м}$ є базовим значенням для подальшого визначення пускового, критичного та допустимого моментів електропривода. Порівняння цих моментів із моментом навантаження шнекового дозатора дозволяє оцінити, чи забезпечує двигун надійний пуск і стійку роботу у заданому діапазоні швидкостей.

Таким чином, на основі параметрів Т-подібної схеми заміщення сформовано математичну модель асинхронного електродвигуна, яка включає розрахунок контуру намагнічування, синхронної та номінальної швидкості, ковзання і електромагнітного моменту.

4.3 Моделювання пускових режимів електропривода

Пусковий режим є одним із найбільш відповідальних режимів роботи електропривода шнекового дозатора. У цей період двигун повинен подолати момент опору, створений сипким матеріалом у корпусі дозатора, втратами в редукторі та силами тертя у механічній частині. При прямому пуску від мережі асинхронний двигун споживає підвищений пусковий струм, що може призводити до динамічних перевантажень механічної передачі та нерівномірного руху шнека.

Для оцінки пускового режиму використовуються механічна та електромеханічні характеристики асинхронного двигуна, отримані на основі математичної моделі. Вони дозволяють визначити пусковий момент, критичний момент, зміну струму статора та ротора, а також перехід двигуна до номінальної швидкості.

Механічна характеристика, побудована за наведеною залежністю, дозволяє оцінити роботу асинхронного двигуна в усьому діапазоні ковзання — від пускового режиму до номінального режиму роботи. Для електропривода шнекового дозатора така характеристика має важливе значення, оскільки вона показує, чи здатний двигун розвивати момент,

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

достатній для подолання опору сипкого матеріалу під час пуску та подальшої сталої роботи.

Природна механічна характеристика асинхронного двигуна ML90S4 наведена на рисунку 4.3.

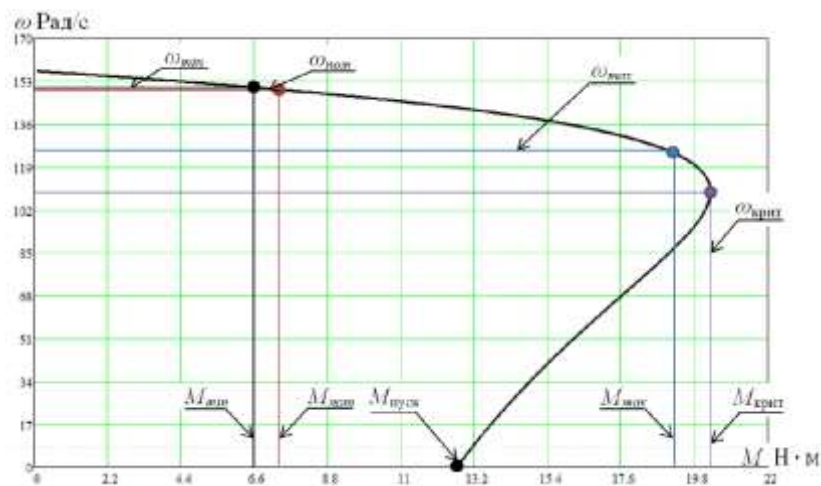


Рис. 4.3 Природна механічна характеристика

На рисунку 4.3 по горизонтальній осі відкладено електромагнітний момент двигуна M , а по вертикальній осі — кутову швидкість обертання ω . Характеристика показує, що при пуску двигун розвиває пусковий момент, після чого при збільшенні швидкості переходить до робочої ділянки механічної характеристики. Робоча зона розташована поблизу номінальної швидкості, де двигун забезпечує стійке обертання при заданому моменті навантаження.

Для шнекового дозатора важливо, щоб робочий момент навантаження був меншим за момент, який може розвивати двигун у відповідній зоні швидкостей. У цьому випадку електропривод має запас за моментом, що забезпечує стійкий пуск і нормальну роботу при зміні властивостей сипкого матеріалу.

Для повного аналізу механічної характеристики необхідно визначити додаткові параметри електродвигуна: критичний момент, пусковий момент, номінальну кутову швидкість та номінальний момент.

Критичний момент асинхронного двигуна визначається за формулою:

$$M_{\text{крит}} = \frac{m \cdot U_{1H}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{K3}^2} \right)} \quad (4.7)$$

$$M_{\text{крит}} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157.08 \cdot (5.542 + \sqrt{5.542^2 + 16.33^2})} = 20.3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Критичний момент характеризує максимальний момент, який може розвинути асинхронний двигун без втрати стійкості. Для даного двигуна $M_{\text{крит}}=20.3 \text{ Н} \cdot \text{м}$, що суттєво перевищує номінальний момент і момент навантаження шнекового дозатора. Пусковий момент визначається через кратність пускового моменту:

$$M_{\text{пуск}} = m_{\text{п}} \cdot M_H = 2.3 \cdot 7.4 = 17.02 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Отримане значення пускового моменту показує, що двигун має достатній запас для запуску шнекового дозатора навіть за наявності матеріалу в робочій зоні шнека. Це важливо, оскільки під час пуску опір руху матеріалу може бути більшим, ніж у сталому режимі. Номінальна кутова швидкість двигуна вже була визначена з урахуванням номінального ковзання:

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - s_H) = 157.08 \cdot (1 - 0.053) = 148.75 \text{ рад/с}$$

Номінальний момент двигуна визначається через номінальну потужність і номінальну кутову швидкість:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{1.1 \cdot 10^3}{148.75} = 7.4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для зведення результатів розрахунку основні параметри механічної характеристики подано в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Основні параметри природної механічної характеристики асинхронного двигуна

Параметр	Позначення	Значення
Номінальний момент	(M_H)	7.4 Н·м
Пусковий момент	($M_{\text{пуск}}$)	17.02 Н·м
Критичний момент	($M_{\text{крит}}$)	20.3 Н·м
Синхронна кутова швидкість	(ω_0)	157.08 рад/с
Номінальна кутова швидкість	(ω_H)	148.75 рад/с
Критичне ковзання	(sk)	0.32

Отже, за результатами аналізу природної механічної характеристики встановлено, що двигун ML90S4 має достатній запас за пусковим і критичним моментом. Це створює умови для надійного запуску шнекового дозатора, однак при прямому пуску від мережі можливе різке зростання струму та моменту. Тому подальший аналіз пускового режиму доцільно виконувати з урахуванням електромеханічних характеристик двигуна та можливостей частотного перетворювача щодо плавного наростання швидкості.

Для уточнення пускового режиму недостатньо оцінити лише моментні характеристики двигуна. Під час пуску важливо також визначити зміну струмів ротора і статора, оскільки саме струмове навантаження визначає електричне навантаження на перетворювач частоти та тепловий режим двигуна. Тому далі розглядаються електромеханічні характеристики, які показують зв'язок між струмами асинхронного двигуна та його кутовою швидкістю.

Спочатку визначимо струм ротора, приведений до обмотки статора. Цей струм залежить від фазної напруги, активних опорів статора і ротора, індуктивного опору короткого замикання та ковзання двигуна.

$$I'_2 = \frac{U_{1H}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{K3}^2}} \quad (4.8)$$

Для номінального режиму ковзання $s_H=0.053$ струм ротора становить:

$$I'_2 = \frac{220}{\sqrt{\left(5.542 + \frac{5.253}{0.053}\right)^2 + 16.33^2}} = 2.1 \text{ A}$$

Отримане значення струму ротора використовується для побудови природної електромеханічної характеристики ротора. Така характеристика показує, як змінюється струм ротора при зміні швидкості обертання двигуна. У пусковому режимі, коли ковзання є найбільшим, струм ротора також має підвищене значення. У міру розгону двигуна ковзання зменшується, а струм ротора переходить до номінального рівня. Електромеханічна характеристика ротора наведена на рисунку 4.4.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

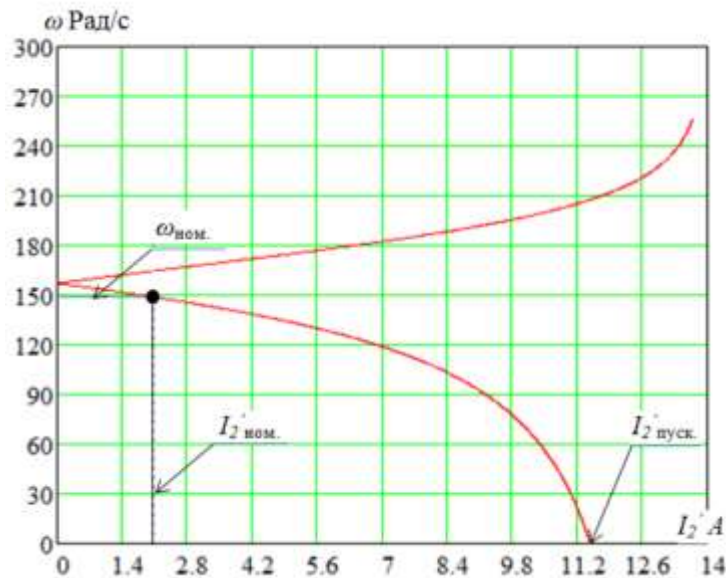


Рис.4.4 Електромеханічна характеристика ротора асинхронного двигуна

З рисунка 4.4 видно, що в зоні номінальної швидкості струм ротора має робоче значення, яке відповідає сталому режиму роботи двигуна. Для шнекового дозатора це означає, що після завершення пускового процесу електропривод переходить до стабільного режиму, у якому струми знижуються порівняно з пусковими значеннями.

Далі визначимо струм статора асинхронного двигуна. Струм статора формується як результат взаємодії струму намагнічування та приведенного струму ротора. Для його визначення використовується вираз:

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2} \quad (4.9)$$

де I_1 — струм статора, А; I_0 — струм намагнічування, А; I_2' — струм ротора, приведений до статора, А; $\sin \varphi_2$ — синус кута зсуву роторного струму.

Для визначення $\sin \varphi_2$ використовується співвідношення:

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_{K3}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H}\right)^2 + X_{K3}^2}} \quad (4.10)$$

Після підстановки параметрів схеми заміщення:

$$\sin \varphi_2 = \frac{16.33}{\sqrt{\left(5.542 + \frac{5.253}{0.053}\right)^2 + 16.33^2}} = 0.149$$

Після цього можна визначити струм статора в номінальному режимі:

$$I_1 = \sqrt{1.77^2 + 2.1^2 + 2 \cdot 1.77 \cdot 2.1 \cdot 0.149} = 2.925 \text{ A}$$

Отримане значення $I_1 = 2.925 \text{ A}$ практично збігається з номінальним струмом двигуна, визначеним за паспортними даними $I_{1H} = 2.93 \text{ A}$. Це підтверджує правильність розрахунку параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна.

Електромеханічна характеристика статора наведена на рисунку 4.5.

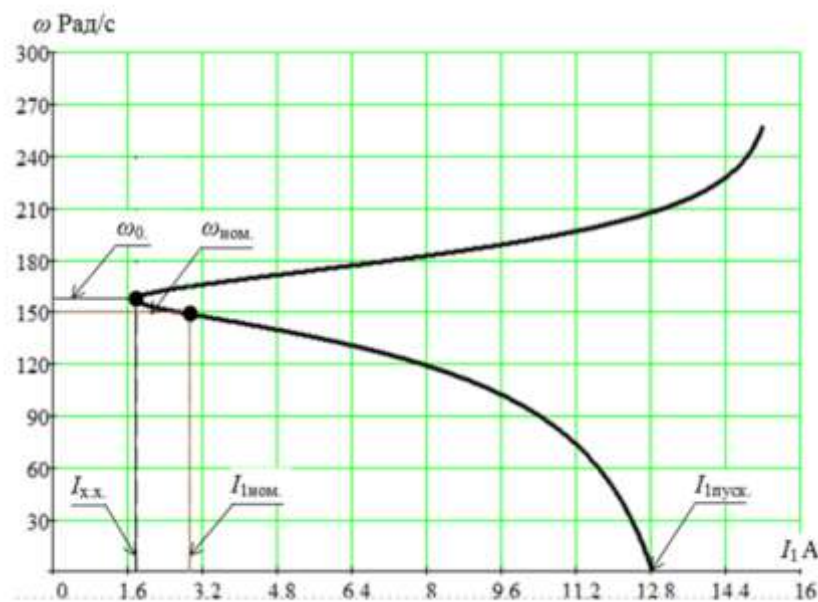


Рис. 4.5. Електромеханічна характеристика статора асинхронного двигуна

З рисунка 4.5 видно, що в пусковому режимі струм статора має найбільше значення, а після розгону двигуна до номінальної швидкості зменшується до робочого рівня. Для модернізованого електропривода шнекового дозатора це має практичне значення, оскільки застосування перетворювача частоти дозволяє обмежити пусковий струм і зробити процес розгону більш плавним.

Таким чином, аналіз пускового режиму показує, що асинхронний двигун має достатній запас за пусковим та критичним моментом для запуску шнекового дозатора. Водночас електромеханічні характеристики підтверджують, що під час пуску струм двигуна є найбільшим, що може спричинити додаткові електричні та механічні навантаження. Застосування

перетворювача частоти дозволяє виконати пуск із плавним наростанням частоти та напруги, обмежити пусковий струм і зменшити ударні навантаження на редуктор і шнековий робочий орган.

Для зменшення пускового струму та механічного удару в модернізованому електроприводі використовується пуск із плавним наростанням частоти. На відміну від прямого пуску від мережі, коли двигун одразу підключається до напруги номінальної частоти 50 Гц, частотний перетворювач формує поступове збільшення частоти та напруги живлення. У результаті синхронна швидкість магнітного поля зростає плавно, а ротор двигуна розганяється без різкого електромагнітного та механічного удару.

Закон наростання частоти під час пуску

$$f(t) = f_{\text{поч}} + \frac{f_{\text{кін}} - f_{\text{поч}}}{t_p} \cdot t \quad (4.11)$$

де $f_{\text{поч}}$ — початкова частота пуску, Гц; $f_{\text{кін}}$ — кінцева частота, Гц; t_p — час розгону, с; t — поточний час, с.

При скалярному керуванні одночасно зі зміною частоти змінюється напруга живлення двигуна. Це дозволяє підтримувати наближено сталий магнітний потік і уникати надмірного зростання струму на низьких частотах.

$$\frac{U_1(t)}{f(t)} = \frac{U_{1H}}{f_H} = \text{const} \quad (4.12)$$

Синхронна кутова швидкість магнітного поля в процесі частотного пуску змінюється відповідно до поточного значення частоти:

$$\omega_0(t) = \frac{2 \cdot \pi \cdot f(t)}{p} \quad (3.13)$$

Пуск електропривода відбувається за умови, що електромагнітний момент двигуна перевищує момент опору шнекового дозатора $M_e > M_c$

За цієї умови двигун розганяється, а після досягнення заданої швидкості переходить до сталого режиму. Для шнекового дозатора такий режим є доцільним, оскільки він зменшує ударні навантаження на редуктор, вал шнека та сипкий матеріал у корпусі дозатора.

Таким чином, аналіз пускового режиму показує, що асинхронний двигун має достатній запас за пусковим та критичним моментом для запуску шнекового дозатора. Застосування перетворювача частоти дозволяє виконати пуск із плавним наростанням частоти та напруги, обмежити пусковий струм, зменшити ударні навантаження на редуктор і шнековий робочий орган та забезпечити більш стабільний на задану продуктивність.

4.4 Моделювання режимів регулювання швидкості шнекового дозатора

Для регулювання швидкості шнекового дозатора використовується імітаційна модель частотно-керованого асинхронного електропривода. Така модель дозволяє оцінити роботу системи не тільки в усталеному режимі, а й під час перехідних процесів, які виникають при пуску, зміні частоти живлення та зміні навантаження на валу двигуна.

Модель це «перетворювач частоти – асинхронний електродвигун», у якій перетворювач частоти формує напругу та частоту живлення статора відповідно до закону скалярного керування.

Імітаційна модель дає можливість простежити зміну основних координат електропривода: струму статора, швидкості обертання, електромагнітного моменту та реакції системи на зміну навантаження. Це особливо важливо для шнекового дозатора, оскільки продуктивність подачі матеріалу безпосередньо пов'язана зі швидкістю обертання робочого органу.

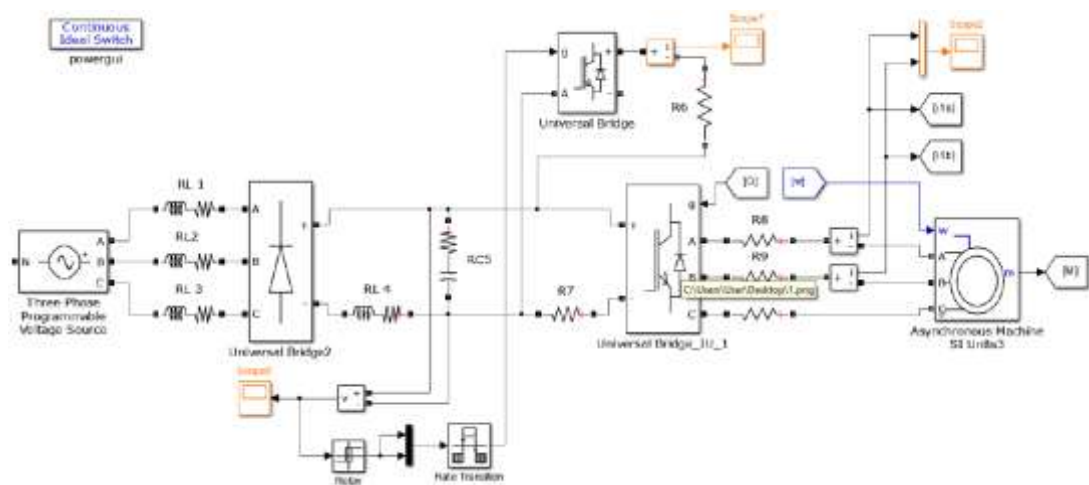


Рис. 4.6 Схема імітаційної моделі частотно-керованого асинхронного електропривода шнекового дозатора

На рисунку 4.6 показано структуру імітаційної моделі, яка відображає роботу силового каналу частотно-керованого електропривода. До складу моделі входять джерело живлення, перетворювач частоти з інверторною частиною, асинхронний електродвигун та блок навантаження, що імітує роботу шнекового дозатора.

У процесі моделювання задається режим пуску електропривода з подальшим виходом на робочу швидкість. При цьому частота живлення двигуна змінюється плавно, що відповідає роботі перетворювача частоти. Завдяки цьому можна оцінити, як змінюються електричні та механічні параметри системи під час розгону.

Для шнекового дозатора важливим є не тільки сам факт досягнення заданої швидкості, а й характер переходу до цього режиму. Різке наростання моменту або струму може створювати додаткові навантаження на редуктор, вал шнека та сипкий матеріал у корпусі дозатора. Тому при аналізі результатів моделювання основну увагу приділено зміні швидкості, моменту та струму двигуна в часі. Перехідні процеси пуску частотно-керованого електропривода шнекового дозатора наведено на рисунку 4.7.

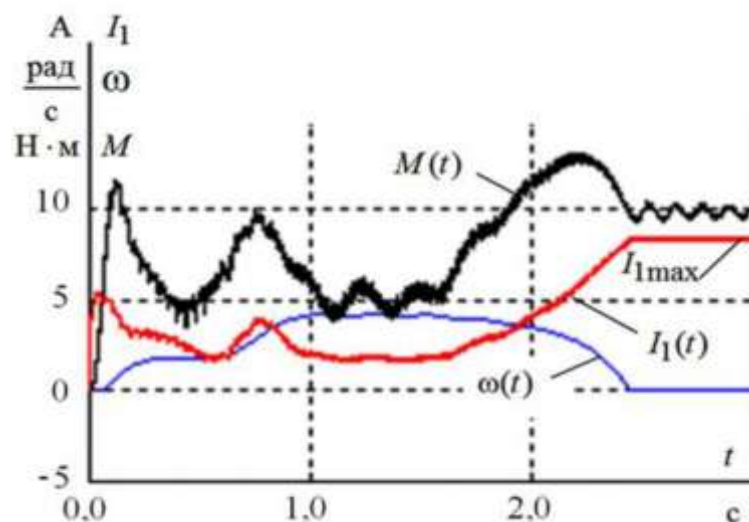


Рис. 4.7 – Перехідні процеси пуску частотно-керованого електропривода

З рисунка 4.7 видно, що під час пуску електропривода відбувається поступове наростання швидкості обертання двигуна. На початку перехідного процесу спостерігаються підвищені значення струму та моменту, що є

характерним для розгону асинхронного двигуна. Після завершення пускового процесу коливання зменшуються, а електропривод переходить до сталого режиму роботи.

Зміна моменту на графіку відображає реакцію електропривода на навантаження з боку шнекового дозатора. При збільшенні опору переміщенню матеріалу момент двигуна зростає, що забезпечує подолання навантаження та підтримання обертання шнека. Одночасно можливе незначне зменшення швидкості, що пояснюється впливом механічного навантаження на вал двигуна.

Отримані результати моделювання показують, що частотно-керований електропривод забезпечує плавний вихід двигуна на задану швидкість та дозволяє змінювати режим роботи шнекового дозатора без механічного втручання в конструкцію привода. Зміна частоти живлення приводить до зміни швидкості обертання асинхронного двигуна, а через редуктор — до зміни швидкості шнека і продуктивності дозування.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Економічна частина дипломної роботи призначена для оцінки доцільності впровадження модернізованого частотно-керованого електропривода шнекового дозатора на харчовому виробництві. У попередніх розділах було показано, що застосування перетворювача частоти дозволяє забезпечити плавний пуск асинхронного електродвигуна, регулювання швидкості обертання шнека та зміну продуктивності дозатора відповідно до технологічної потреби. Однак технічна доцільність модернізації повинна бути доповнена економічним обґрунтуванням.

Основний економічний ефект від впровадження частотно-керованого електропривода формується за рахунок зменшення непродуктивних витрат електроенергії, зниження пускових струмів, зменшення динамічних навантажень на механічну частину дозатора та підвищення стабільності технологічного процесу. Крім прямої економії електроенергії, важливе значення мають супутні вигоди: зменшення зносу редуктора, підшипникових вузлів і шнека, скорочення кількості аварійних зупинок, підвищення точності дозування сипкого матеріалу та покращення керованості виробничого процесу.

У даному розділі визначаються капітальні вкладення у модернізацію електропривода, розраховуються експлуатаційні витрати, обґрунтовується вибір варіанта впровадження та оцінюється економічна вигода від застосування перетворювача частоти у складі електропривода шнекового дозатора.

5.1 Капітальні вкладення у проект модернізації.

Капітальні вкладення у проект модернізації визначають загальну суму одноразових витрат, необхідних для впровадження частотно-керованого електропривода шнекового дозатора. До складу таких витрат входить вартість перетворювача частоти, захисної та комутаційної апаратури, кабельної

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

продукції, монтажних і налагоджувальних робіт, а також резерв на непередбачені витрати.

У даній роботі модернізація електропривода передбачає збереження існуючої механічної частини дозатора та встановлення перетворювача частоти для керування асинхронним електродвигуном. Такий варіант є економічно доцільним, оскільки не потребує повної заміни шнекового дозатора, редуктора або електродвигуна, а основні витрати пов'язані саме з установленням частотного перетворювача та допоміжного обладнання.

Загальні капітальні вкладення у проєкт модернізації визначаються за формулою:

$$K_{\Sigma} = K_{\text{обл}} + K_{\text{м}} + K_{\text{н}} + K_{\text{рез}} \quad (5.1)$$

де K_{Σ} — загальні капітальні вкладення, грн; $K_{\text{обл}}$ — вартість обладнання, грн; $K_{\text{м}}$ — витрати на монтаж, грн; $K_{\text{н}}$ — витрати на налагодження, грн; $K_{\text{рез}}$ — резерв на непередбачені витрати, грн.

Вартість обладнання визначається як сума вартості основних елементів, необхідних для модернізації електропривода:

$$K_{\text{обл}} = C_{\text{ПЧ}} + C_{\text{зах}} + C_{\text{каб}} + C_{\text{доп}} \quad (5.2)$$

де $C_{\text{ПЧ}}$ — вартість перетворювача частоти, грн; $C_{\text{зах}}$ — вартість захисної та комутаційної апаратури, грн; $C_{\text{каб}}$ — вартість кабельної продукції та з'єднувальних елементів, грн; $C_{\text{доп}}$ — вартість допоміжних матеріалів і монтажних елементів, грн. Орієнтовний склад капітальних витрат наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Капітальні вкладення у модернізацію електропривода шнекового дозатора

Найменування витрат	Вартість, грн
Перетворювач частоти для двигуна 1,1 кВт	9800
Захисна та комутаційна апаратура	2750
Кабельна продукція, клеми, з'єднувальні елементи	1500
Допоміжні монтажні матеріали	1800
Монтажні роботи	3000
Налагоджувальні роботи	2500
Резерв на непередбачені витрати	2135
Разом	23485

Визначимо вартість обладнання:

$$K_{\text{обл}} = 9800 + 2750 + 1500 + 1800 = 15850 \text{ грн}$$

Резерв на непередбачені витрати приймаємо у розмірі 10 % від суми обладнання, монтажних і налагоджувальних робіт:

$$K_{\text{рез}} = 0.1 \cdot (K_{\text{обл}} + K_{\text{м}} + K_{\text{н}}) \quad (5.3)$$

$$K_{\text{рез}} = 0.1 \cdot (15850 + 3000 + 2500) = 2135 \text{ грн}$$

Тоді загальні капітальні вкладення у проєкт модернізації становлять:

$$K_{\Sigma} = 15850 + 3000 + 2500 + 2135 = 23485 \text{ грн}$$

Отже, орієнтовна сума капітальних вкладень у модернізацію частотно-керованого електропривода шнекового дозатора становить 23485 грн. Основну частину витрат складає придбання перетворювача частоти та допоміжної електротехнічної апаратури. При цьому модернізація не потребує повної заміни шнекового дозатора, тому капітальні вкладення залишаються порівняно невеликими та можуть бути компенсовані за рахунок зменшення експлуатаційних витрат і підвищення енергоефективності роботи електропривода.

5.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати визначають поточні витрати, пов'язані з роботою шнекового дозатора протягом року. Для електропривода основними складовими таких витрат є витрати на електроенергію, технічне обслуговування та поточний ремонт обладнання. У даній роботі порівнюються два варіанти роботи електропривода: до модернізації та після встановлення перетворювача частоти.

До модернізації електропривод працює переважно з постійною швидкістю, тому споживання електроенергії не завжди відповідає фактичній потребі технологічного процесу. Після модернізації швидкість обертання шнека може змінюватися відповідно до потрібної продуктивності, що дозволяє зменшити середню споживану потужність, пускові навантаження та витрати на обслуговування механічної частини.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

Річний фонд часу роботи обладнання визначається за формулою:

$$t_p = N_d \cdot t_{зм} \quad (5.4)$$

де t_p — річний фонд часу роботи обладнання, год; N_d — кількість робочих днів на рік; $t_{зм}$ — тривалість роботи обладнання протягом доби, год.

Для розрахунку приймаємо: $N_d = 250$, $t_{зм} = 12$ и отримаємо: $t_p = 250 \cdot 12 = 3000$ год

Річне споживання електроенергії визначається за формулою:

$$W = P_{сер} \cdot t_p \quad (5.5)$$

де W — річне споживання електроенергії, кВт·год; $P_{сер}$ — середня споживана потужність електропривода, кВт; t_p - річний фонд часу роботи, год.

Для базового варіанта, тобто до модернізації, середню споживану потужність приймаємо: $P_{до} = 0.85$ кВт

Тоді річне споживання електроенергії до модернізації становить:
 $W_{до} = 0.85 \cdot 3000 = 2550$ Квт/год

Після модернізації електропривод працює з регулюванням швидкості, тому середня споживана потужність зменшується, $P_{після} = 0.62$ кВт.

Річне споживання електроенергії після модернізації: $W_{після} = 0.62 \cdot 3000 = 1860$ кВт\год

Витрати на електроенергію визначаються за формулою: $С_{ел} = W \cdot Т_{ел}$

де $С_{ел}$ — річні витрати на електроенергію, грн; W — річне споживання електроенергії, кВт·год; $Т_{ел}$ — тариф на електроенергію, грн/кВт·год.

Для розрахунку приймаємо тариф: $Т_{ел} = 6.0$ грн/кВт год

Тоді витрати на електроенергію до модернізації:
 $С_{ел} = 2550 \cdot 6.0 = 15300$ грн

Витрати на електроенергію після модернізації: $С_{ел.після} = 1860 \cdot 6.0 = 11160$ грн

Крім витрат на електроенергію, необхідно врахувати витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт. Після встановлення

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

перетворювача частоти пуск стає плавнішим, тому витрати на обслуговування та ремонт зменшуються. Загальні річні експлуатаційні витрати визначаються за формулою:

$$C_{\text{екс}} = C_{\text{ел}} + C_{\text{ТО}} + C_{\text{рем}} \quad (5.6)$$

де Секс — загальні річні експлуатаційні витрати, грн; Сел — витрати на електроенергію, грн; СТО — витрати на технічне обслуговування, грн; Срем — витрати на поточний ремонт, грн. Орієнтовні експлуатаційні витрати наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Річні експлуатаційні витрати ел.привода шнекового дозатора

Стаття витрат	До модернізації, грн	Після модернізації, грн
Витрати на електроенергію	15300	11160
Технічне обслуговування	2500	2000
Поточний ремонт	2000	1200
Разом	19800	14360

Загальні річні експлуатаційні витрати до модернізації становлять:

$$\text{Секс.до} = 15300 + 2500 + 2000 = 19800 \text{ грн}$$

Загальні річні експлуатаційні витрати після модернізації:

$$\text{Секс.після} = 11160 + 2000 + 1200 = 14360 \text{ грн}$$

Отже, після впровадження частотно-керованого електропривода річні експлуатаційні витрати зменшуються з 19800 грн до 14360 грн.

5.3 Економічне обґрунтування варіанта впровадження

Економічне обґрунтування варіанта впровадження виконується для вибору найбільш доцільного способу модернізації електропривода шнекового дозатора. У даній роботі розглядається не повна заміна дозатора, а модернізація існуючого електропривода шляхом встановлення перетворювача частоти. Такий варіант дозволяє зберегти наявний шнековий механізм,

редуктор і електродвигун, але забезпечити плавний пуск, регулювання швидкості обертання шнека та зменшення експлуатаційних витрат.

Для порівняння можна розглянути три можливі варіанти:

1. Експлуатація існуючого електропривода без модернізації.
2. Повна заміна шнекового дозатора та електропривода.
3. Модернізація існуючого електропривода шляхом встановлення перетворювача частоти.

Перший варіант не потребує капітальних вкладень, але не усуває основні недоліки: відсутність плавного регулювання продуктивності, підвищені пускові струми, ударні навантаження на редуктор і шнек, а також підвищені експлуатаційні витрати. Другий варіант є технічно ефективним, однак потребує значних капітальних витрат, оскільки передбачає заміну не тільки електричної, а й механічної частини обладнання. Третій варіант є найбільш раціональним, оскільки забезпечує потрібний технічний ефект за порівняно невеликих капітальних вкладень.

Для економічного порівняння варіантів використаємо показник приведених річних витрат:

$$Z = C_{\text{екс}} + E_n \cdot K_{\Sigma} \quad (5.7)$$

де Z — приведені річні витрати, грн/рік; $C_{\text{екс}}$ — річні експлуатаційні витрати, грн/рік; E_n — нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень; K_{Σ} — капітальні вкладення, грн.

Для розрахунку приймаємо нормативний коефіцієнт ефективності: $E_n=0.15$

Для базового варіанта без модернізації капітальні вкладення не враховуються, тому приведені витрати дорівнюють річним експлуатаційним витратам:

$$Z_{\text{до}} = C_{\text{екс.до}} = 19800 \text{ грн/рік}$$

Для варіанта модернізації з використанням перетворювача частоти капітальні вкладення становлять $K_{\Sigma}=23485$ грн, а річні експлуатаційні

витрати після модернізації — Секс.після=14360 грн Тоді приведені витрати становлять: $Z_{\text{мод}}=14360+0.15\cdot 23485=17882.75$ грн/рік

Отримане значення показує, що приведені річні витрати після модернізації є меншими, ніж у базовому варіанті: $Z_{\text{мод}} < Z_{\text{до}}$

Різниця приведених витрат становить:

$$\Delta Z = Z_{\text{до}} - Z_{\text{мод}} = 19800 - 17882.75 = 1917.25 \text{ грн/рік}$$

Табл. 5.3 – Порівняння варіантів впровадження модернізації електропривода

Варіант	Кап. вклад, грн	Експлуатаційні витрати, грн/рік	Приведені витрати, грн/рік	Оцінка
Без модернізації	0	19800	19800	Не усуває технічні недоліки
Повна заміна дозатора й електропривода	65000	13500	23250	Технічно ефективно, але дорого
Встановлення перетворювача частоти	23485	14360	17882.75	Найбільш доцільний варіант

Як видно з таблиці 5.3, найменші приведені витрати має варіант модернізації існуючого електропривода шляхом встановлення перетворювача частоти. Повна заміна обладнання забезпечує певне зменшення експлуатаційних витрат, однак потребує значно більших капітальних вкладень. Варіант без модернізації не потребує початкових витрат, але залишає підвищені витрати на електроенергію, обслуговування та ремонт.

Таким чином, економічно доцільним є впровадження частотно-керованого електропривода без повної заміни шнекового дозатора. Такий варіант забезпечує зменшення приведених витрат, підвищує керованість технологічного процесу, знижує динамічні навантаження на механічну частину та створює передумови для подальшого зменшення експлуатаційних витрат.

5.4 Розрахунок економічної вигоди від впровадження частотно-керованого електропривода

Економічна вигода від впровадження частотно-керованого електропривода визначається за рахунок зменшення річних експлуатаційних витрат після модернізації. Основними складовими економії є зниження витрат на електроенергію, зменшення витрат на технічне обслуговування та скорочення витрат на поточний ремонт механічної частини шнекового дозатора.

У попередньому підрозділі було визначено, що річні експлуатаційні витрати до модернізації становлять Секс.до=19800 грн, а після модернізації — Секс.після=14360 грн. Тоді річна економічна вигода визначається як різниця між витратами до та після впровадження частотно-керованого електропривода.

$$E_p = \text{Секс.до} - \text{Секс.після} = 19800 - 14360 = 5440 \text{ грн/рік}$$

Отже, річна економічна вигода від впровадження частотно-керованого електропривода становить 5440 грн/рік. Ця сума формується за рахунок прямого зменшення витрат на електроенергію та супутнього зменшення витрат на обслуговування і ремонт.

Економія електроенергії визначається як різниця між витратами на електроенергію до і після модернізації:

$$E_{el} = \text{Сел.до} - \text{Сел.після} = 15300 - 11160 = 4140 \text{ грн/рік}$$

Таким чином, основна частина економічної вигоди забезпечується саме за рахунок зменшення споживання електроенергії. Це пояснюється тим, що після встановлення перетворювача частоти електропривод не працює постійно в режимі максимальної швидкості, а може змінювати частоту обертання шнека відповідно до необхідної продуктивності дозатора.

Додаткова економія формується за рахунок зменшення витрат на технічне обслуговування та поточний ремонт:

$$E_{\text{рем}} = (C_{\text{ТО.до}} + C_{\text{рем.до}}) - (C_{\text{ТО.після}} + C_{\text{рем.після}}) \quad (5.7)$$

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

Після підстановки: $E_{\text{рем}} = (2500 + 2000) - (2000 + 1200) = 1300$ грн/рік

Зменшення витрат на обслуговування та ремонт пов'язане з тим, що частотний перетворювач забезпечує плавний пуск електродвигуна, знижує ударні навантаження на редуктор, вал шнека та підшипникові вузли. У результаті зменшується інтенсивність зношування механічних елементів дозатора. Структуру річної економічної вигоди наведено в таблиці 5.4.

Табл. 5.4 Економічної вигода

Джерело економії	Значення, грн/рік
Економія електроенергії	4140
Зменшення витрат на технічне обслуговування та ремонт	1300
Загальна річна економічна вигода	5440

Для оцінки ефективності капітальних вкладень визначимо строк окупності проєкту. Він показує, за який період річна економія компенсує початкові витрати на модернізацію.

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\Sigma}}{E_p} \quad (5.8)$$

де $T_{\text{ок}}$ — строк окупності, років; K_{Σ} — капітальні вкладення у модернізацію, грн; E_p — річна економічна вигода, грн/рік.

$$T_{\text{ок}} = \frac{23485}{5440} = 4.32 \text{ роки}$$

Отриманий строк окупності становить 4.3 роки. Отже, впровадження частотно-керованого електропривода шнекового дозатора забезпечує річну економічну вигоду 5440 грн/рік, строк окупності 4.3 роки та коефіцієнт економічної ефективності 23.2 %. Крім прямого економічного результату, модернізація забезпечує підвищення керованості дозатора, плавний пуск електродвигуна, зменшення динамічних навантажень і стабільнішу роботу технологічного обладнання.

5.5 Супутні вигоди від реалізації запропонованого рішення

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крім прямої економічної вигоди, яка була визначена у попередньому підрозділі, впровадження частотно-керованого електропривода шнекового дозатора забезпечує низку супутніх технічних та організаційних переваг. Ці вигоди не завжди можна безпосередньо виразити у грошовій формі, однак вони суттєво впливають на надійність обладнання, стабільність технологічного процесу та якість роботи харчового виробництва.

Основною супутньою перевагою є зменшення динамічних навантажень під час пуску електродвигуна. При прямому пуску асинхронного двигуна виникають підвищені пускові струми та різке наростання електромагнітного моменту. Це створює ударні навантаження на редуктор, вал шнека, підшипникові вузли та з'єднувальні елементи. Використання перетворювача частоти дозволяє забезпечити плавний розгін електропривода, унаслідок чого механічна частина дозатора працює в м'якшому режимі. Супутні вигоди від реалізації запропонованого рішення наведено в таблиці 5.5.

Табл.5.5 – Супутні вигоди від впровадження

Напрямок впливу	Супутня вигода	Практичний результат
Пуск електродвигуна	Плавне наростання швидкості	Зменшення пускових струмів і ударних моментів
Механічна частина	Менше навантаження на редуктор, вал і підшипники	Зниження зносу та збільшення ресурсу обладнання
Технологічний процес	Плавне регулювання продуктивності	Стабільніша подача сипкого матеріалу
Енергоспоживання	Робота відповідно до потрібної продуктивності	Зменшення непродуктивних витрат електроенергії
Обслуговування	Менша кількість аварійних режимів	Скорочення простоїв і витрат на ремонт
Якість дозування	Більш рівномірне переміщення матеріалу	Підвищення стабільності технологічного процесу

Таким чином, реалізація запропонованого рішення забезпечує не лише пряму економічну вигоду у розмірі 5440 грн/рік, а й низку додаткових переваг: підвищення надійності електропривода, зменшення механічного зносу, покращення плавності пуску, стабілізацію продуктивності дозатора та підвищення енергоефективності роботи обладнання.

6. ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці — це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності. Закон України «Про охорону праці» визначає основні положення щодо реалізації права працівників на безпечні та здорові умови праці, а також регулює відносини між роботодавцем і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища.

Оскільки дипломна робота присвячена модернізації частотно-керованого електропривода шнекового дозатора на харчовому виробництві з підвищенням енергоефективності, тоді розглядаються питання охорони праці під час експлуатації електроприводу який включає асинхронний електродвигун, перетворювач частоти, комутаційну та захисну апаратуру, кабельні лінії, редуктор і механічний робочий орган у вигляді шнека.

6.1 Організація та управління охороною праці. Працівник, який обслуговує шнековий дозатор, виконує свою діяльність у виробничому приміщенні харчового підприємства.

На підприємстві повинна функціонувати система управління охороною праці, яка охоплює організацію безпечних умов праці, навчання працівників, проведення інструктажів, контроль технічного стану обладнання, забезпечення працівників засобами індивідуального захисту та організацію розслідування нещасних випадків. Основними завданнями такої системи є попередження виробничого травматизму, зниження впливу шкідливих виробничих факторів і забезпечення відповідності робочих місць вимогам нормативних документів.

Відповідальність за стан охорони праці на підприємстві несе роботодавець або уповноважена ним особа. На підприємстві створюється служба охорони праці або призначається відповідальний працівник, який організовує контроль за виконанням вимог безпеки. До функцій служби

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

охорони праці належать розроблення інструкцій, контроль проведення інструктажів, участь у перевірці стану робочих місць, аналіз причин небезпечних ситуацій та розроблення профілактичних заходів.

Для працівників, які обслуговують електропривод шнекового дозатора, обов'язковим є проходження навчання та інструктажів з охорони праці. Перед початком самостійної роботи працівник проходить вступний інструктаж, первинний інструктаж на робочому місці, а надалі — повторний, позаплановий або цільовий інструктаж залежно від характеру виконуваних робіт. Роботи в електроустановках повинні виконуватися з урахуванням вимог Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Важливим елементом організації охорони праці є технічне обслуговування обладнання. Перевірці підлягають стан кабельних ліній, справність автоматичних вимикачів, стан перетворювача частоти, справність аварійної кнопки зупинки, наявність захисних кожухів і блокувань рухомих частин шнекового дозатора.

Отже, організація охорони праці на харчовому підприємстві повинна забезпечувати безпечні умови експлуатації шнекового дозатора, електродвигуна, перетворювача частоти та шафи керування. Основними напрямками є навчання персоналу, контроль технічного стану обладнання, забезпечення засобами захисту, дотримання правил електробезпеки та своєчасне проведення профілактичних заходів.

6.2 Аналіз умов праці на робочому місці оператора шнекового дозатора. Робоче місце оператора шнекового дозатора розташоване у виробничому приміщенні харчового підприємства. Основними функціями працівника є контроль роботи дозатора, спостереження за подачею сипкого матеріалу, керування режимом роботи електропривода, візуальна перевірка стану обладнання, а також участь у його очищенні та технічному обслуговуванні.

На робочому місці оператора можуть діяти такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори: електрична напруга в шафі керування та силових колах

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

електропривода, рухомі частини шнека і редуктора, пил сипких харчових матеріалів, шум від роботи електродвигуна та редуктора, можливе локальне підвищення температури поблизу електрообладнання, недостатнє освітлення, а також пожежна небезпека, пов'язана з пилом, коротким замиканням або перегрівом обладнання.

Для забезпечення безпечних умов праці необхідно проаналізувати освітлення, стан повітря робочої зони, мікроклімат, електробезпеку та пожежну безпеку.

Освітлення робочого місця. Воно повинно забезпечувати можливість безпечного візуального контролю за роботою обладнання, станом органів керування, індикаторів перетворювача частоти, кнопок пуску та зупинки, а також за наявністю матеріалу в зоні завантаження. Недостатнє освітлення може призвести до помилок під час керування обладнанням, несвоєчасного виявлення несправностей і підвищення ризику травмування.

Зорова робота оператора шнекового дозатора пов'язана переважно зі спостереженням за станом обладнання, показниками індикації та положенням органів керування. Вона не належить до надточних зорових робіт, однак потребує достатнього рівня освітленості, оскільки працівник повинен своєчасно помічати відхилення в роботі дозатора.

Для робочого місця оператора шнекового дозатора можна прийняти такі орієнтовні вимоги до освітлення: у зоні загального обслуговування — не менше 200 лк, у зоні шафи керування та панелі індикації — 300 лк, у зоні технічного обслуговування або огляду вузлів — до 300–500 лк залежно від складності виконуваних операцій. Освітлювальні прилади повинні бути розташовані так, щоб не створювати засліплення, різких тіней і відблисків на поверхнях панелі керування. Основні вимоги до освітлення робочого місця наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Орієнтовні вимоги до освітлення робочого місця оператора шнекового дозатора

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зона робочого місця	Характер роботи	Рекомендована освітленість, лк
Загальна зона обслуговування дозатора	Переміщення, спостереження, контроль	200
Шафа керування електроприводом	Контроль індикації, пуск, зупинка, налаштування	300
Зона завантаження матеріалу	Контроль подачі сипкого матеріалу	200–300
Зона технічного обслуговування	Огляд, дрібні ремонтні операції	300–500

Повітря робочої зони. Під час роботи шнекового дозатора на харчовому виробництві основним фактором, який впливає на якість повітря робочої зони, є пил сипких матеріалів. До таких матеріалів можуть належати борошно, цукор, сухі суміші, крохмаль, подрібнені добавки або інші порошкоподібні компоненти. У нормальному режимі роботи обладнання пиловиділення повинно бути мінімальним, однак під час завантаження, пересипання, очищення або розгерметизації кожуха дозатора пил може потрапляти у повітря робочої зони.

Пил харчових матеріалів може викликати подразнення органів дихання, осідати на поверхнях обладнання, погіршувати санітарний стан приміщення та впливати на роботу електрообладнання. Накопичення пилу на корпусах електродвигуна, перетворювача частоти або в шафі керування може погіршувати тепловідведення, сприяти перегріву та збільшувати пожежну небезпеку.

У повітрі робочої зони оператора шнекового дозатора за нормальних умов не повинно бути значних концентрацій токсичних речовин. Однак побутовий пил, пил сипкого харчового матеріалу та дрібнодисперсні частинки можуть бути присутніми. Тому для підтримання належної якості повітря необхідно передбачати загальнообмінну вентиляцію, місцеві відсмоктувачі в зоні пересипання матеріалу, герметизацію корпусу шнека та регулярне очищення обладнання.

Мікрокліматичні умови праці. Мікроклімат виробничого приміщення характеризується температурою повітря, відотною вологістю, швидкістю руху повітря, температурою поверхонь та інтенсивністю теплового

випромінювання. Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 мікроклімат виробничих приміщень визначається сукупністю параметрів внутрішнього середовища, які впливають на тепловий обмін працівника з оточенням.

У виробничому приміщенні при нормальній роботі електропривода потужністю 1,1 кВт тепловиділення не є значним. Параметри мікроклімату для робочого місця наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Орієнтовні параметри мікроклімату на робочому місці оператора

Параметр	Холодний період року	Теплий період року
Температура повітря, °С	18–22	20–25
Відносна вологість, %	40–60	40–60
Швидкість руху повітря, м/с	0,1–0,2	0,1–0,3
Інтенсивність теплового випромінювання	Не повинна створювати перегрів працівника	Не повинна створювати перегрів працівника

Для забезпечення допустимих мікрокліматичних умов необхідно підтримувати справну роботу системи вентиляції, не допускати перегріву електрообладнання, регулярно очищувати вентиляційні отвори перетворювача частоти та електродвигуна, а також контролювати температуру в зоні шафи керування. Отже, мікрокліматичні умови на робочому місці оператора шнекового дозатора повинні забезпечувати нормальний тепловий стан працівника і надійну роботу електрообладнання. Основними заходами є вентиляція, контроль температури, очищення обладнання від пилу та недопущення перегріву електродвигуна і перетворювача частоти.

Ел.- та пожежна безпека. Електробезпека є одним із найважливіших питань під час експлуатації частотно-керованого електропривода шнекового дозатора. До складу електрообладнання входять асинхронний електродвигун, перетворювач частоти, автоматичні вимикачі, кабельні лінії, шафа керування, клемні з'єднання та органи керування. Небезпека ураження електричним струмом може виникати при пошкодженні ізоляції, відсутності або

несправності захисного заземлення, відкриванні шафи керування під напругою, порушенні правил технічного обслуговування або потраплянні пилу та вологи всередину електрообладнання.

Пожежна безпека під час експлуатації шнекового дозатора пов'язана з наявністю електрообладнання та пилу сипких харчових матеріалів.

Для зниження пожежної небезпеки необхідно регулярно очищувати обладнання від пилу, перевіряти стан електричних контактів, не допускати перевантаження електродвигуна, забезпечувати нормальну вентиляцію шафи керування і перетворювача частоти. У виробничому приміщенні повинні бути наявні первинні засоби пожежогасіння, зокрема вогнегасники, придатні для гасіння електрообладнання. Основні небезпечні фактори та заходи захисту наведено в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Небезпечні фактори під час експлуатації електропривода

Небезпечний фактор	Можливі наслідки	Заходи захисту
Пошкодження ізоляції кабелів	Ураження електричним струмом	Перевірка ізоляції, заземлення, захисне відключення
Відкриті рухомі частини шнека	Травмування працівника	Захисні кожухи, блокування, заборона очищення під час роботи
Перегрів електродвигуна	Відмова двигуна, пожежна безпека	Контроль навантаження, вентиляція, захист від перевантаження
Пил сипких матеріалів	Погіршення умов праці, пожежна безпека	Аспірація, герметизація, регулярне очищення
Несправність перетворювача частоти	Аварійна зупинка, пошкодження обладнання	Технічне обслуговування, контроль температури, захисна апаратура

Таким чином, електро- та пожежна безпека під час експлуатації частотно-керованого електропривода забезпечується справним заземленням, надійною ізоляцією, захисною апаратурою, правильною організацією

ремонтних робіт, очищенням обладнання від пилу та дотриманням інструкцій з охорони праці.

6.3 Розрахунок захисного заземлення електроприводу.

Захисне заземлення є одним із основних технічних засобів електробезпеки. Його призначення полягає у зниженні напруги дотику до безпечного значення у разі пошкодження ізоляції та появи напруги на металевих неструмоведучих частинах обладнання. Для шнекового дозатора заземленню підлягають корпус асинхронного електродвигуна, шафа керування, корпус перетворювача частоти, металевий корпус дозатора та інші металеві конструкції, які можуть опинитися під напругою.

Необхідне розрахувати суміщене ЗУ для цехової трансформаторної підстанції 6/0,4 кВ, приєднаної до електромережі з ізольованою нейтраллю. При цьому прийняти: розімкнений контур ЗУ, як вертикальний електрод - кут шириною $b\varphi = 16$ мм; $\varphi = 50$ м, горизонтальний електрод - $S_2 = 40$ мм²; $d_2 = 12$ мм.

Початкові дані: Грунт кам'янистий, $H_0 = 5$ м, $l_{\text{воз}} = 15$ км, $l_{\text{каб}} = 60$ км, $n\varphi = 6$ шт, $l\varphi = 2,5$ м, $a\varphi = 5$ м, $R_e = 15$ Ом.

Розрахунковий струм замикання на землю:

$$J_z = \frac{U_\varphi \cdot (35 \cdot l_{\text{каб}} + l_{\text{воз}})}{350} = J_z = \frac{6 \cdot (35 \cdot 60 + 15)}{350} = 36,3 \text{ А}$$

де U_φ - лінійна напруга сіті, кВ; $l_{\text{каб}}$ - загальна довжина підключених до сіті кабельних ліній, км; $l_{\text{воз}}$ - загальна довжина підключених до сіті ЛЕП, км.

Визначення розрахункового питомого опору ґрунту:

$$\rho_{\text{расч}} = \rho_{\text{табл}} \cdot \psi = 700 \cdot 1,3 = 910 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

де $\rho_{\text{табл.}} = 700$ Ом · м - зміряний питомий опір ґрунту (з табл. 6.3 [2] для кам'янистого ґрунту); $\psi = 1,3$ - кліматичний коефіцієнт, прийнятий для кам'янистого ґрунту.

Визначення необхідності штучного заземлювача і обчислення його необхідного опору.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Опір ЗУ R_{Σ} вибирається з табл. 6.7 [2] залежно від $U_{\text{ЕУ}}$ і $\rho_{\text{расч}}$ в місці споруди ЗУ, а також режиму нейтралі даної електромережі:

$$R_{\Sigma}^H = \frac{0.25\rho}{J_{\Sigma}} = \frac{0.25 \cdot 910}{36,3} = 6,3 \text{ Ом} \leq 100 \text{ Ом}$$

$R_e > R_{\Sigma} \Rightarrow$ штучний заземлювач необхідний. Його необхідне заземлення:

$$R_u \leq \frac{R_e \cdot R_{\Sigma}^H}{R_e - R_{\Sigma}^H} \leq 10,9 \text{ Ом}$$

Визначення довжини горизонтальних електродів для розімкненого контура ЗУ: $l_{\Gamma} = n_b \cdot a_b = 6 \cdot 5 = 30 \text{ м}$, де a_b - відстань між вертикальними електродами n_b . Розрахункове значення опору вертикального електроду:

$$\begin{aligned} H &= H_0 + 0,5 \cdot l_b = 0,5 + 0,5 \cdot 2,5 = 1,75 \text{ м} \\ R_b &= \frac{\rho_{\text{расч}}}{2 \cdot \pi \cdot l_b} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l_b}{d_b} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot H + l_b}{4 \cdot H - l_b} \right) = \\ &= \frac{910}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 2,5}{0,016} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1,75 + 2,5}{4 \cdot 1,75 - 2,5} \right) = 354 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Розрахункове значення опору горизонтального електроду по (формулі г) :

$$R_{\Gamma} = \frac{\rho_{\text{расч}}}{2 \cdot \pi \cdot l_{\Gamma}} \cdot \ln \frac{l_{\Gamma}^2}{d_{\Gamma} \cdot H_0} = \frac{910}{2 \cdot 3,14 \cdot 30} \cdot \ln \frac{30^2}{0,012 \cdot 0,5} = 57 \text{ Ом}$$

Коефіцієнти використання: $\eta_b = 0,73$ $\eta_{\Gamma} = 0,48$.

Опір групового заземлювача:

$$R = \frac{R_b \cdot R_{\Gamma}}{R_b \cdot \eta_{\Gamma} + R_{\Gamma} \cdot \eta_b \cdot n_b} = \frac{354 \cdot 57}{354 \cdot 0,48 + 57 \cdot 0,73 \cdot 6} = 48 \text{ Ом}$$

Приймаємо $n = 25$, тоді $l_2 = 125 \text{ м}$, $R_2 = 17,2 \text{ Ом}$

Ом, отже $R > R_u$, при $n_b = 45$, $l_2 = 225 \text{ м}$, $R_2 = 10,3 \text{ Ом}$

$$R_k = R_e \cdot R / (R_e + R) \text{ Ом}$$

$$R_l = 15 \cdot 10,8 / (15 + 10,8) = 6,27 \text{ Ом} \leq 6,3 \text{ Ом}$$

R_e – природний опір, Ом, R_u – опір штучного заземлювача, Ом, R_b – опір вертикального електроду, Ом, R_2 – опір горизонтального електроду, Ом, R – опір групового заземлювача, Ом, R_k – загальний опір комбінованого ЗУ, Ом, η_b η_{Γ} – коефіцієнт використання вертикального і горизонтального

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електродів, av – відстань між електродами, м, lv – довжина електродів, м, nv – кількість вертикальних електродів. Отже, розрахунок здійснено для забезпечення допустимого рівня електричної безпеки.

6.4 Заходи з охорони праці під час експлуатації електропривода.

Основні організаційні заходи:

- допуск до роботи працівників з інструктажем з охорони праці; призначення відповідальних осіб за безпечну експлуатацію електрообладнання;
- періодична перевірка знань працівників з питань електробезпеки;
- оформлення ремонтних робіт відповідно до встановленого порядку;

До технічних заходів належать:

1. наявність захисного заземлення;
2. використання автоматичних вимикачів і захисту від перевантаження;
3. захист рухомих частин шнекового дозатора кожухами;
4. встановлення аварійної кнопки зупинки у доступному місці;

Під час роботи з перетворювачем частоти необхідно враховувати, що навіть після відключення живлення у ланці постійного струму може певний час зберігатися залишкова напруга. Тому відкривання шафи керування, перевірка клем або заміна елементів повинні виконуватися тільки після витримки часу, зазначеного в технічній документації на перетворювач, і після перевірки відсутності напруги.

Працівники повинні користуватися засобами індивідуального захисту: спецодягом, захисним взуттям, рукавицями, захисними окулярами під час очищення обладнання, а під час електротехнічних робіт — електрозахисними засобами. Основні заходи з охорони праці наведено в таблиці 6.5.

Табл. 6.5 – Заходи з охорони праці під час експлуатації електроприводу

Напрямок безпеки	Захід	Очікуваний результат
------------------	-------	----------------------

Електробезпека	Перевірка заземлення та ізоляції	Зменшення ризику ураження електричним струмом
Механічна безпека	Захисні кожухи на рухомих частинах	Запобігання травмуванню працівника
Пожежна безпека	Очищення обладнання від пилу, контроль перегріву	Зниження ризику займання
Організаційна безпека	Інструктажі та допуск до роботи	Зменшення кількості помилок персоналу

Висновки розділу 6.

Було виконано аналіз умов праці на робочому місці оператора шнекового дозатора. Розглянуто освітлення робочої зони, стан повітря виробничого приміщення, мікрокліматичні умови, електробезпеку та пожежну безпеку. Встановлено, що основними небезпечними та шкідливими факторами є електрична напруга, рухомі частини шнека, пил сипких харчових матеріалів, можливість перегріву електрообладнання та пожежна небезпека.

У розділі виконано розрахунок захисного заземлення. За результатами розрахунку прийнято заземлювальний пристрій із 18 вертикальних електродів довжиною 3 м. Фактичний опір заземлювального пристрою становить 3.783 Ом, що не перевищує допустиме значення 4 Ом. Отже, прийняте рішення забезпечує необхідний рівень електробезпеки.

Запропоновано комплекс заходів з охорони праці під час експлуатації частотно-керованого електропривода. Реалізація цих заходів дозволяє знизити ризик травмування працівників, підвищити надійність роботи обладнання та забезпечити безпечні умови праці на робочому місці оператора шнекового дозатора.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі вирішено актуальну задачу модернізації частотно-керованого електропривода шнекового дозатора на харчовому виробництві з метою підвищення енергоефективності.

У процесі виконання роботи проведено аналіз процесів дозування сипких матеріалів та способів регулювання їх продуктивності. Обґрунтовано, що найбільш доцільним способом регулювання подачі є зміна швидкості обертання шнека за допомогою частотно-керованого електропривода.

У теоретичній частині розглянуто принцип дії шнекового дозатора як об'єкта електропривода, залежність продуктивності від частоти обертання шнека, механічні характеристики навантаження та принципи частотного керування асинхронним електродвигуном.

У розрахунковій частині виконано вибір асинхронного електродвигуна та перетворювача частот. Проведено розрахунок продуктивності дозатора, потужності, моменту електропривода та механічних характеристик.

У роботі запропоновано технічне рішення, яке полягає у модернізації електропривода шляхом використання перетворювача частоти зі скалярним законом керування. Розроблено структурну схему електропривода, сформовано математичну модель асинхронного двигуна на основі Т-подібної схеми заміщення та проаналізовано пускові режими. Результати моделювання підтвердили, що частотно-керований електропривод забезпечує плавний вихід двигуна на задану швидкість і стабільну роботу дозатора.

В економічному розділі обґрунтовано проект впровадження частотно-керованого електропривода, а у розділі охорони праці питання промислової безпеки.

Таким чином, поставлена мета дипломної роботи досягнута. Запропоноване рішення є технічно обґрунтованим, економічно доцільним і може бути рекомендоване до впровадження на харчових виробництвах для підвищення енергоефективності та стабільності роботи шнекового дозатора.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник. М.Г.Попов іч, О.Ю.Лозинський, В.Б.Клепиков та ін.; За ред. М.Г.Поповіча, О.Ю.Лозинського. Київ: Либідь, 2005 р. 680 с.
2. Видмиш А.А. Теорія електропривода. Курсове та дипломне проектування. Самостійна та індивідуальна робота студентів: навчальний посібник. А. А. Видмиш, С. М. Бабій, В. В. Петрусь. Вінниця: ВНТУ, 2012 р. 96 с.
3. Жулай Є.Л., Зайцев Б.В., Лавріненко Ю.М., Марченко О.С., Войтюк Д.Г. Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній (за ред. Жулая Є.Л.). Київ: Вища освіта, 2001 р. 288 с.
4. Видмиш А.А., Трошин О.А. Теорія електропривода. Лабораторний практикум/ Навчальний посібник. Вінниця: ВДТУ, 2003 р. 135 с.
5. Матвійчук В.А., Стаднік М.І., Рубаненко О.О. Електропривод виробничих машин і механізмів. Навчальний посібник з виконання курсової роботи. Вінниця: ВНАУ, 2016 р. 320 с.
6. Колб А. А. Теорія електроприводу. Навчальний посібник. Донецьк: Національний гірничий університет, 2006 р. 511 с.
7. Браславський І.Я., Ішматов З.Ш. Реалізація енергоощадних технорлогій на основі регульованих асинхронних електроприводів. Київ: Електроінформ. 2003 р. 15 с.
8. Ю. М. Лаврієнко Електропривод. Підручник. Київ: Ліра-К 2009 р. 504 с.
9. Жулай Є.Л., Зайцев Б.В., Лавріненко Ю.М., Марченко О.С., Войтюк Д.Г. Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній(за ред. Жулая Є.Л.). Київ: Вища освіта, 2001 р. 288 с.
10. Ярошенко Л.В. Лабораторний практикум з електропривода та електрообладнання: Навчальний посібник. Вінниця: РВВ ВНАУ, 2010 р. 192с.
11. Лехман С. Д., Рубльов В. І., Рябцев Б. І. Запобігання аварійності і травматизму у сільському господарстві. Київ: Урожай, 1993 р. 267 с.
12. Основи охорони праці. Купник М.П. і ін. Київ: Основа, 2000 р. 41с.

					КРБ. АТЕіРС.141.641-03.1.12	Арк.
						96
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		