

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра АТЕіРС



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

на тему «Модернізація електропривода гвинтового конвеєру сипучих матеріалів»

(назва кваліфікаційної роботи згідно наказу ОНТУ)

Здобувача (ки) Засоба М.В.
(прізвище, ініціали)

4 курсу АЕМ-40 групи

Керівник д.т.н., професор Осадчук П. І.
(посада, прізвище та ініціали)

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від _____ 2026 р., протокол № ____.

Виконуючий обов'язки АТЕРС
(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

Освітньо-кваліфікаційний рівень: Бакалавр

Галузь знань: 14 – Електрична інженерія

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри ЕтаМ
д.т.н., проф. Осадчук П.І.

—
«_____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

здобувач СВО «Бакалавр» гр. АЕМ-40

Засоба Максим Віталійович

1. Тема роботи: **«Модернізація електропривода гвинтового конвеєру сипучих матеріалів»**

Керівник роботи: Осадчук Петро Ігорович, д.т.н., професор.

Затверджено наказом ОНТУ № 641-03 від 21.11.2025 р.

2. Строк подання студентом роботи: 01.06.2026 р.

3. Об'єкт дослідження. Електропривід гвинтового конвеєру.

4. Предмет дослідження. Управління електроприводом шнекового механізму.

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

Розділ 1. Загальні відомості по гвинтовим конвеєрам сипучих матеріалів.

1.1. Історична ретроспектива та концептуальні основи застосування гвинтових механізмів.

1.2. конструкція та технічні характеристики гвинтового конвеєра

Розділ 2. Розрахунок навантажень і вибір потужності двигуна

2.1 Вимоги до автоматизованого електропривода гвинтового конвеєра.

2.2 Розрахунок кінематичної схеми.

Розділ 3. Моделювання роботи електропривода на персональній обчислювальній машині.

3.1 Постановка задачі моделювання

3.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення

Розділ 4. Економічне обґрунтування та розрахунок ефективності.

Розділ 5.. Організаційна частина.

6. Перелік демонстраційного матеріалу:

Ручний привод гвинта Архімеда як початковий етап розвитку механізмів

Сучасний індивідуальний електропривод гвинтового конвеєра на базі мотор-редуктора

Структурно-логічна схема технологічного процесу переміщення зернової маси в умовах елеватора

Загальний вигляд, компоновання та основні конструктивні елементи гвинтового конвеєра КВ-320

Загальний вигляд електродвигуна 4А112М4У3

Принципова електрична схема базового нерегульованого електропривода конвеєра.

Кінематична схема електромеханічної системи конвеєра.

Природна механічна характеристика асинхронного двигуна 4А112М4У3 та момент опору гвинтового конвеєра.

7. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
	.		

8. Дата видачі завдання 21.11.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1	Розділ 1. Загальні відомості по гвинтовим конвеєрам.	10.01.2025	
2	Розділ 2. Розрахунок навантажень та вибір двигуна	10.02.2025	
3	Розділ 3. Моделювання роботи на ПЕОЕМ	8.03.2025	
4	Розділ 4. Економічне обґрунтування та розрахунок ефективності	20.03.2025	
5	Розділ 5. Організаційна частина	15.04.2025	
6	Захист дипломного проекту	24-26. 06.2026	

Здобувач СВО Засоба М.В. _____

Керівник д.т.н., проф. Осадчук П. І. _____

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 _____ Засоба М.В.

АННОТАЦІЯ

Засоба М. В. «Модернізація електропривода гвинтового конвеєру сипучих матеріалів». Кваліфікаційна робота бакалавра. - Одеса: ОНТУ, 2026. - 67 с. Бібліогр.: 10. Іл.: 14. Табл.: 1. Презентація: 15 слайдів.

Об'єктом розробки є процес електромеханічного перетворення енергії в автоматизованому електроприводі гвинтового конвеєра КВ-320, що функціонує в умовах змінного навантаження при переміщенні зернових мас. Мета роботи полягає у технічному обґрунтуванні та впровадженні системи частотного регулювання «перетворювач частоти – асинхронний двигун» для підвищення енергоефективності та надійності механізму.

У роботі проведено аналіз технологічного процесу транспортування сипучих матеріалів та виявлено недоліки існуючої релейно-контакторної схеми керування, зокрема значні пускові струми, що у 7 разів перевищують номінальні, та руйнівні динамічні удари в трансмісії. Виконано розрахунок кінематичної схеми та статичної потужності навантаження, на основі чого обґрунтовано вибір асинхронного двигуна 4A112M4Y3 потужністю 5.5 кВт та перетворювача частоти Schneider Electric серії Altivar Machine ATV320. Шляхом імітаційного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink доведено, що модернізація дозволяє знизити пусковий струм із 80.15 А до 17.18 А та забезпечити плавний розгін шнека за лінійною рампою.

Інвестиційна привабливість проєкту підтверджується розрахунком річного економічного ефекту у розмірі 30759.6 грн, що досягається завдяки економії електроенергії та зниженню витрат на сервісне обслуговування редуктора. Термін окупності капітальних вкладень становить 1.26 року. У

розділі з безпеки праці розроблено заходи щодо захисту персоналу та забезпечення вибухобезпеки в умовах заповнених приміщень.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ГВИНТОВИЙ КОНВЕЄР, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ПЛАВНИЙ ПУСК, MATLAB/SIMULINK, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ТЕРМІН ОКУПНОСТІ.

ABSTRACT

Zasoba M. V. "Modernization of the Electric Drive for a Bulk Material Screw Conveyor." Bachelor's Thesis. – Odesa: ONTU, 2026. – 67 p. Bibl.: 10. Ill.: 14. Tabl.: 1. Presentation: 15 slides.

The **object of development** is the process of electromechanical energy conversion in the automated electric drive of the KV-320 screw conveyor, which operates under variable load conditions while transporting grain masses. The **aim of the work** is the technical justification and implementation of a "frequency converter – induction motor" control system to enhance the energy efficiency and reliability of the mechanism.

The study provides an **analysis** of the technological process of bulk material transportation and identifies the shortcomings of the existing relay-contactor control scheme, specifically significant starting currents (exceeding nominal values by 7 times) and destructive dynamic shocks in the transmission. The kinematic scheme and static load power were calculated, based on which the selection of the **4A112M4U3 induction motor** (5.5 kW) and the **Schneider Electric Altivar Machine ATV320** frequency converter was justified. Through simulation modeling in **MATLAB/Simulink**, it was proven that the modernization reduces the starting current from 80.15 A to 17.18 A and ensures smooth acceleration of the screw along a linear ramp.

The **investment attractiveness** of the project is confirmed by the calculation of an annual economic effect of 30,759.6 UAH, achieved through energy savings and reduced maintenance costs for the gearbox. The payback period for capital investments is **1.26 years**. In the occupational safety section, measures were developed for personnel protection and explosion safety in dusty environments.

KEYWORDS: SCREW CONVEYOR, INDUCTION MOTOR, FREQUENCY CONVERTER, SOFT START, MATLAB/SIMULINK, ENERGY EFFICIENCY, PAYBACK PERIOD.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АД - асинхронний двигун;

АСР - автоматична система регулювання;

ЕК - екзаменаційна комісія;

ЕРС - електрорушійна сила;

ККД - коефіцієнт корисної дії;

КРБ - кваліфікаційна робота бакалавра;

ПЕОМ - персональна електронно-обчислювальна машина;

ПЧ - перетворювач частоти;

ПЧ-АД - система «перетворювач частоти – асинхронний двигун»;

РПЗ - розрахунково-пояснювальна записка;

СВО - ступінь вищої освіти;

$U/f = \text{const}$ - закон скалярного керування (сталість відношення напруги до частоти).

ПЕОМ - персональна електронно-обчислювальна машина;

ВСТУП	3
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА	4
1.1 Історична ретроспектива та концептуальні основи застосування гвинтових механізмів	4
1.2 Конструкція і технічні характеристики гвинтового конвеєра	9
1.3 Загальна характеристика існуючого електропривода гвинтового конвеєра	13
2 РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	17
2.1 Вимоги до автоматизованого електропривода гвинтового конвеєра ...	17
2.2 Розрахунок кінематичної схеми привода шнека	19
2.3 Розрахунок потужності і вибір двигуна електропривода.....	21
2.4 Розрахунок і побудування механічної характеристики двигуна	26
2.5 Розрахунок і вибір кабелю живлення електропривода.....	27
2.6 Розрахунок і вибір апаратів захисту і управління електропривода	29
2.7 Опис існуючої релейно-контакторної схеми управління	31
2.8 Обґрунтування доцільності застосування частотного електропривода	32
Розділ 3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА ПЕОМ.....	34
3.1 Постановка задачі моделювання роботи електропривода на ПЕОМ...	34
3.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення двигуна електропривода	35
3.3 Моделювання прямого пуску двигуна електропривода конвеєра	37

					<i>КРБ 141 АТЕіРС</i>						
Зм.	АРК.	№ документа	Підпис	Дата	<i>Модернізація електропривода гвинтового конвеєру сипучих матеріалів</i>				Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив	Засоба М.В								у		
Керівник	Шейда Голбад К.А.										
Реценз.									<i>ОНТУ Гр, АЕМ-40</i>		
Консульт.											

4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ.....	43
4.1 Розрахунок капітальних інвестицій у модернізацію привода	43
4.2 Розрахунок експлуатаційної економії електроенергії.....	44
4.3 Оцінка зниження витрат на технічне обслуговування та ремонти	46
4.4 Визначення терміну окупності проєкту	47
5. ОРГАНІЗАЦІЙНА ТА ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	49
5.1 Організація та технологія монтажу електропривода гвинтового конвеєра	49
5.2 Організація та технологія технічного обслуговування системи електропривода	50
5.3 Охорона праці та техніка безпеки при експлуатації електроустановок	50
5.4 Організація охорони праці та техніки безпеки при обслуговуванні	51
ВИСНОВКИ.....	53
Список використаних джерел	55
Аналіз графічного матеріалу та джерела:	57

ВСТУП

Актуальність теми Ефективне функціонування сучасних зернових терміналів та елеваторних комплексів безпосередньо залежить від надійності транспортно-технологічних ліній. Гвинтові конвеєри, зокрема модель КВ-320, є ключовими механізмами для переміщення сипучих матеріалів, проте їх експлуатація за традиційними схемами прямого пуску призводить до значних динамічних зусиль у механічних вузлах та суттєвих енергетичних втрат. Необхідність модернізації таких приводів шляхом впровадження систем частотного регулювання дозволить оптимізувати режими роботи шнека та забезпечити стабільність технологічного процесу в умовах змінного навантаження.

Мета дослідження Полягає у технічному обґрунтуванні та розробці модернізованого електропривода гвинтового конвеєра на основі системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун» для забезпечення стабільного транспортування сипучих матеріалів та підвищення загальної енергоефективності обладнання.

Завдання дослідження Передбачають проведення комплексного аналізу технологічного процесу конвеєра, виконання розрахунків потужності для вибору оптимального електродвигуна, обґрунтування параметрів перетворювача частоти, а також імітаційне моделювання динамічних режимів роботи системи для підтвердження ефективності пропонованих технічних рішень.

Об'єкт дослідження Процес електромеханічного перетворення енергії в автоматизованому електроприводі гвинтового конвеєра, що функціонує в умовах змінного навантаження при переміщенні зернових мас у безперервному циклі виробництва.

Предмет дослідження Електромеханічні характеристики та режими керування асинхронним двигуном при застосуванні частотного регулювання для оптимізації пускових параметрів та регулювання продуктивності шнекового механізму.

Методи дослідження Базуються на використанні основних положень теорії автоматизованого електропривода для вибору силового устаткування, методів математичного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink для аналізу перехідних процесів, а також розрахунково-аналітичних методів для оцінки економічної доцільності модернізації та забезпечення безпечних умов праці.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Історична ретроспектива та концептуальні основи застосування гвинтових механізмів

Гвинтовий конвеєр, відомий у сучасній інженерії як шнек, пройшов унікальний шлях технічної трансформації, що бере свій початок від античних часів. Фундаментальною основою цього механізму став винахід Архімеда у III столітті до нашої ери, який спочатку призначався виключно для потреб іригації та осушення корабельних трюмів. У той історичний період приводна частина була невід'ємною від м'язових зусиль людини, що фактично робило систему замкненою через безпосередній біологічний зв'язок між опором середовища та прикладеною силою. Хоча першочерговим завданням гвинта було підняття води, сама фізика процесу заклала потенціал для транспортування будь-яких середовищ, де сили зовнішнього тертя матеріалу об стінки корпусу переважають сили тертя об лопаті гвинта.

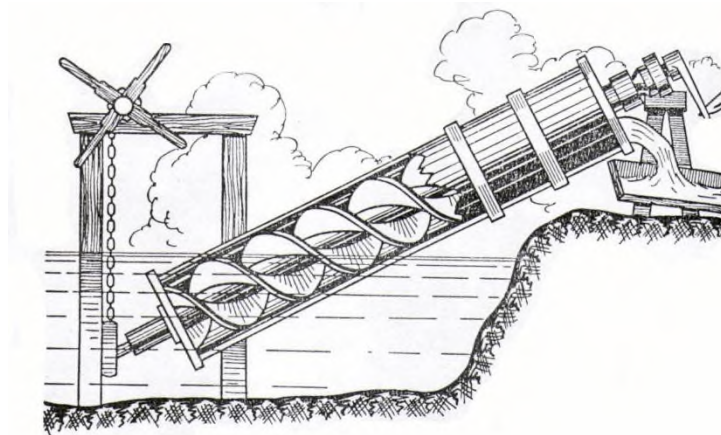


Рисунок 1.1 - Ручний привод гвинта Архімеда як початковий етап розвитку механізмів

Логічний перехід від переміщення рідин до транспортування сипучих матеріалів, зокрема зерна, відбувся під впливом промислового прогресу та необхідності захисту продукції від навколишнього середовища. Вибір гвинтової конструкції для зернових мас став технологічним проривом, оскільки закритий

металевий жолоб ідеально вирішував проблему вибухонебезпечного запилення, властивого відкритим методам переміщення. Еволюція привода від парових машин до асинхронних електродвигунів дозволила перетворити шнек із примітивного пристрою на високопродуктивний агрегат. Сучасний електропривод розглядається вже не просто як джерело механічної енергії, а як інтелектуальна система, де перетворювач частоти адаптує крутний момент до фактичної щільності зерна, запобігаючи аварійним зупинкам "під завалом".

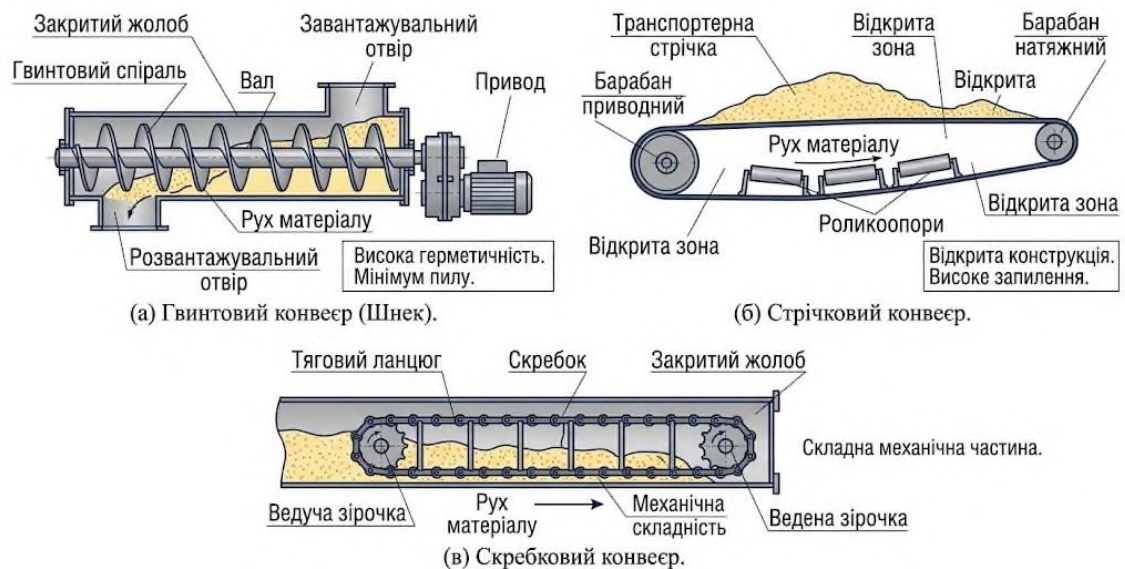


Рисунок 1.2 - Сучасний індивідуальний електропривод гвинтового конвеєра на базі мотор-редуктора

Незважаючи на появу альтернативних технологій, шнек зберігає свою актуальність завдяки поєднанню герметичності та енергетичної ефективності. Якщо порівнювати його зі стрічковими конвеєрами, останні демонструють вищу продуктивність на великих дистанціях, але виявляються непридатними для внутрішньоцехового переміщення зерна через неможливість повної ізоляції пилових потоків. Скребкові механізми, хоч і дозволяють будувати складні траєкторії, суттєво програють гвинтовим у надійності через складність ланцюгових передач, які потребують частого ремонту. Пневматичний же

					КРБ 141 АТЕІРС АЕМ-40	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		5

транспорт, попри свою абсолютну герметичність, вимагає колосальних витрат енергії на стиснення повітря, що робить його економічно недоцільним порівняно з електромеханічним приводом шнека КВ-320. Таким чином, трансформація античного водопідйомника у сучасну автоматизовану систему транспортування зерна є результатом постійного пошуку балансу між енергоефективністю та безпекою виробництва.



1.3 Схематичне порівняння конструкцій конвеєрів для сипучих вантажів

Технологічний процес транспортування сипучих вантажів є однією з найважливіших та найбільш енергоємних складових у загальному ланцюгу переробки, зберігання та реалізації сільськогосподарської продукції. На сучасних зернопереробних підприємствах, елеваторних комплексах та комбикормових заводах переміщення сировини між різними стадіями обробки відбувається практично безперервно. Під терміном «сипучі матеріали» в контексті агропромислового комплексу традиційно розуміють широку номенклатуру вантажів: продовольче та фуражне зерно різних культур (пшениця, ячмінь, кукурудза, жито), насіння олійних культур (соняшник, ріпак), а також продукти їх глибокої переробки, такі як борошно, висівки, макуха та гранульовані комбикорми.

Ефективна організація переміщення таких вантажів вимагає глибокого розуміння їхніх специфічних фізико-механічних властивостей. На відміну від

штучних або рідких вантажів, сипучі матеріали утворюють складне багатофазне

середовище, яке поєднує в собі властивості як твердого тіла, так і рідини. До ключових характеристик, що безпосередньо впливають на вибір типу транспортувального обладнання та розрахунок його електропривода, належать насипна щільність, гранулометричний склад, коефіцієнт внутрішнього тертя, вологість, а також кут природного укосу. Крім того, зернові маси відрізняються високою сипучістю та здатністю до самосортування під час руху, що вимагає забезпечення максимально плавного та стабільного режиму транспортування для збереження однорідності партії.

Технологічна лінія, що розглядається в даній роботі, є типовим вузлом приймання та первинного переміщення зерна. Сутність цього технологічного етапу полягає у безперервному та ритмічному транспортуванні зернової маси від вузла розвантаження (наприклад, автомобільного або залізничного приймального бункера) до наступних ланок технологічного ланцюга - очисних машин, сушарок або приймальних норій, які забезпечують подальший вертикальний підйом вантажу до силосів зберігання. У цій системі гвинтовий конвеєр виконує роль проміжної горизонтальної або похилої транспортної артерії, яка повинна гарантувати суворо дозовану подачу матеріалу.

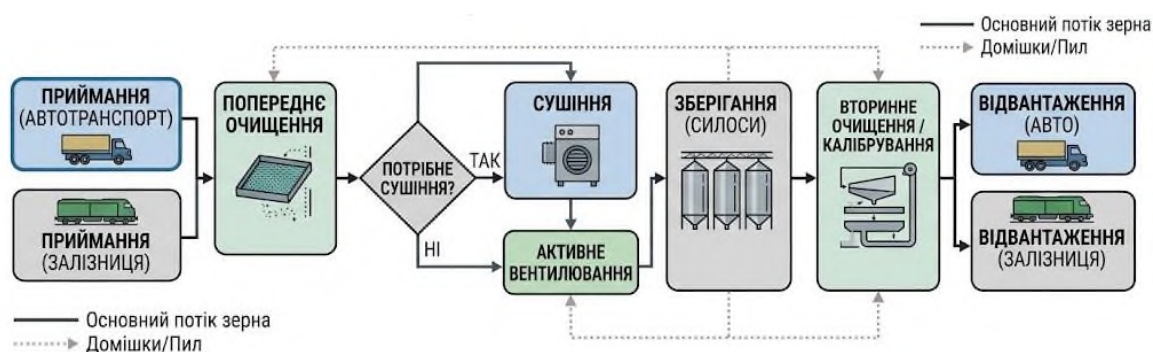


Рисунок 1.3 - Структурно-логічна схема технологічного процесу переміщення зернової маси в умовах елеватора.

З фізичної точки зору, процес переміщення матеріалу в гвинтовому конвеєрі

базується на принципі трансформації обертального руху робочого органу (гвинта) у поступальний рух вантажу. Коли сипучий матеріал потрапляє через завантажувальний патрубок у внутрішню порожнину нерухомого жолоба, він заповнює простір між витками шнека. Під час обертання вала на частинки зерна починають діяти відцентрові сили, сили гравітації та складний комплекс сил тертя. Головною умовою працездатності такого механізму є те, що сила тертя сипучого матеріалу об внутрішні стінки нерухомого жолоба повинна перевищувати силу його тертя об поверхню металевих лопатей гвинта. Завдяки цій різниці сил тертя, зернова маса не втягується в суцільне обертання разом із валом, а починає ковзати вздовж осі конвеєра, подібно до того, як нерухома гайка переміщується по різьбі гвинта при його обертанні.

Особливістю даного технологічного процесу є його жорстка прив'язка до продуктивності суміжних машин у лінії. Гвинтовий конвеєр рідко працює як ізольований механізм; найчастіше він є частиною каскадної системи. Це означає, що його продуктивність має бути ідеально синхронізована з пропускною здатністю приймальної норії або сепаратора. Якщо конвеєр транспортуватиме вантаж із надлишковою швидкістю, це неминуче призведе до переповнення перехідних патрубків, завалу наступної машини та аварійної зупинки всієї лінії. У протилежному випадку, при недостатній подачі, дороге технологічне обладнання працюватиме в режимі недовантаження, що різко знижує загальну рентабельність та енергоефективність підприємства. Саме ця обставина робить неможливим ефективне використання конвеєрів із нерегульованою швидкістю і вимагає впровадження інтелектуальних систем електропривода для тонкого налаштування вантажопотоку.

Крім того, технологічний процес транспортування сухих сільськогосподарських вантажів супроводжується інтенсивним виділенням пилу. Верновий пил у певних концентраціях є не лише потужним алергеном для обслуговуючого персоналу, але й становить серйозну вибухопожежну небезпеку. Концентрація пилу в повітрі понад критичну межу здатна спровокувати об'ємний

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						8
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

вибух руйнівної сили від найменшої іскри. Тому технологія вимагає проведення процесу транспортування у повністю герметизованих закритих системах. Гвинтовий конвеєр ідеально задовольняє цю вимогу: його робоча зона повністю

ізолювана металевим кожухом із гумовими ущільнювачами. Однак така закритість ускладнює візуальний контроль за наповненням жолоба, що додатково обґрунтовує необхідність застосування систем автоматизованого електропривода, які здатні контролювати завантаження механізму за допомогою непрямих параметрів, таких як споживаний двигуном струм або крутний момент.

1.2 Конструкція і технічні характеристики гвинтового конвеєра

Гвинтовий конвеєр (шнек) відноситься до класу транспортувальних машин безперервної дії без гнучкого тягового органу. Його конструкція оптимізована для переміщення пилоподібних, дрібнозернистих та кускових матеріалів на порівняно невеликі відстані (зазвичай до 30-40 метрів) у горизонтальній, похилій або рідше у вертикальній площинах. Завдяки відсутності складних елементів, що швидко зношуються, таких як конвеєрні стрічки, ланцюги або ковші, шнекові механізми відрізняються високою експлуатаційною надійністю та простотою технічного обслуговування.

Базовим об'єктом дослідження та подальшої модернізації в межах даного дипломного проекту обрано промисловий стаціонарний гвинтовий конвеєр моделі КВ-320 (конвеєр шнековий з номінальним діаметром гвинта 320 мм). Цей агрегат призначений для транспортування зернової маси в межах елеваторного комплексу під кутом нахилу траси до 15 градусів відносно горизонту.

Конструктивно конвеєр являє собою збірну металеву конструкцію, що складається з кількох функціональних вузлів, кожен з яких відіграє критичну роль у забезпеченні безперебійного технологічного процесу. Основними складовими елементами механізму є:

1. **Жолоб (корпус)** - виконує одночасно функцію несучої станини для кріплення інших вузлів та закритого каналу, по якому безпосередньо рухається матеріал. Жолоб конвеєра КВ-320 має U-подібний (коритоподібний) переріз і збирається з окремих секцій стандартної довжини, виготовлених із листової зносостійкої сталі. Зверху корпус
2. герметично закривається плоскими металевими кришками, що запобігає розпиленню продукту та захищає механізм від потрапляння сторонніх предметів.
3. **Гвинт (шнек)** - головний робочий орган конвеєра, який безпосередньо контактує з вантажем і передає йому кінетичну енергію. Він складається з товстостінного трубчастого вала, на зовнішню поверхню якого приварена сталева спіральна лопать (перо гвинта). Для транспортування зерна застосовується гвинт із суцільною поверхнею витків. Крок гвинтової лінії в даній моделі дорівнює зовнішньому діаметру шнека, що є класичним рішенням для переміщення матеріалів із високою сипучістю.
4. **Опорні вузли (підшипникові опори)** - забезпечують вільне обертання вала шнека всередині жолоба та сприймають радіальні й осьові навантаження. Конвеєр оснащено двома кінцевими опорами, які для запобігання потраплянню абразивного зернового пилу в підшипники кочення винесені за межі торцевих стінок корпусу. Враховуючи значну довжину конвеєра, конструкцією передбачено також наявність проміжної підвісної опори. Її призначення - запобігання неприпустимому прогину трубчастого вала під власною вагою та вагою вантажу, що могло б призвести до затирання лопатей об дно жолоба. Проміжна опора оснащується спеціальними зносостійкими антифрикційними вкладишами.
5. **Завантажувальний та розвантажувальний патрубки** - вузли сполучення конвеєра із суміжним технологічним обладнанням. Завантажувальний патрубок розташовується у хвостовій частині жолоба на його верхній

крищі, тоді як розвантажувальний отвір розміщується у головній (приводній) частині в днищі корпусу.

6. **Приводна станція** - електромеханічний комплекс, призначений для генерування крутного моменту та його передачі на робочий орган. До складу приводної станції входить електричний двигун, з'єднувальні муфти та понижуючий редуктор, який узгоджує високу кутову швидкість ротора двигуна з необхідною за умовами технологічного процесу низькою швидкістю обертання шнека.

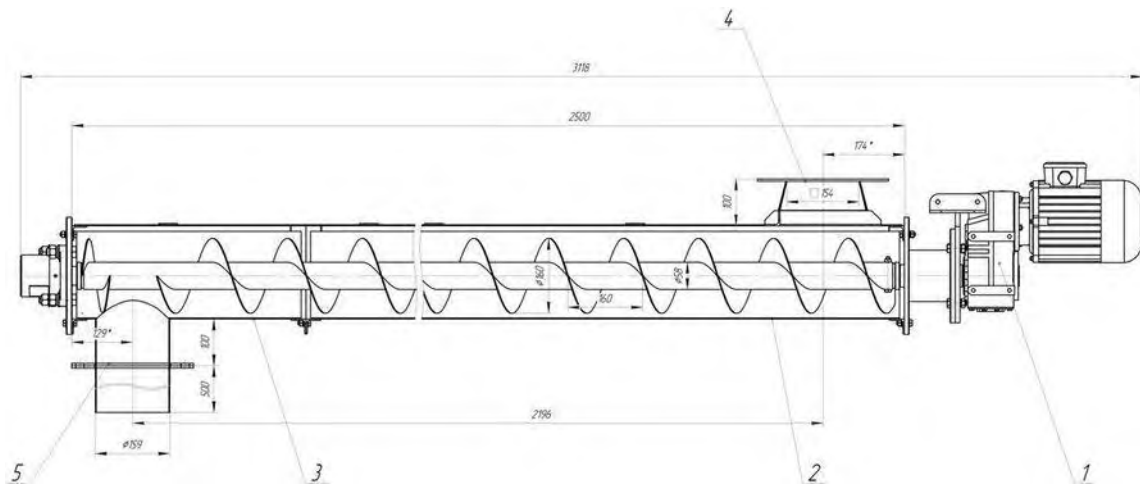


Рисунок 1.4 - Загальний вигляд, компоновка та основні конструктивні елементи гвинтового конвеєра KB-320. 1 – *мотор-редуктор*, 2 – *корпус*, 3 – *шнек*, 4 – *вхідний патрубок*, 5 – *вихідний патрубок*.

Технічні та геометричні параметри конвеєра є вихідними даними для виконання подальших інженерних розрахунків електропривода. Основні паспортні характеристики конвеєра KB-320, задіяного у досліджуваному технологічному процесі, зведено у таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики об'єкта управління (конвеєра КВ-320)

Найменування параметра	Одиниця вимірювання	Значення
Номінальна (розрахункова) продуктивність	Т/год	30
Геометрична довжина траси транспортування	м	8.0
Кут нахилу траси до горизонту	град.	15.
Зовнішній діаметр гвинта	мм	320.

Продовження таблиці 1.1

Найменування параметра	Одиниця вимірювання	Значення
Крок гвинтової лінії	мм	320.
Номінальна частота обертання вала шнека	хв ⁻¹	125
Розрахункова насипна щільність вантажу	т/м ³	0.75
Коефіцієнт заповнення жолоба вантажем	-	0.35

Наведені у таблиці характеристики відображають номінальний режим роботи механізму. Однак в умовах реального виробництва фактична продуктивність та навантаження на робочий орган можуть суттєво відхилятися від номінальних значень через неоднорідність потоку зерна, зміну його вологості або аварійні ситуації, що висуває підвищені вимоги до системи керування приводним двигуном.

1.3 Загальна характеристика існуючого електропривода гвинтового конвеєра

Для перетворення електричної енергії мережі в механічну енергію обертання, необхідну для подолання сил тертя та переміщення маси вантажу, гвинтовий конвеєр KB-320 оснащується індивідуальним електроприводом змінного струму. В базовій (заводській) комплектації обладнання, що експлуатується на більшості вітчизняних підприємств, використовується найбільш поширена і конструктивно проста схема - нерегульований електропривод на основі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Кінематичний ланцюг передачі потужності існуючого привода побудований за класичною схемою. Вал електродвигуна через пружну муфту з'єднаний із вхідним валом двоступеневого циліндричного зубчастого редуктора. Редуктор виконує функцію механічного перетворювача, зменшуючи частоту обертання та пропорційно збільшуючи крутний момент до значень, необхідних для обертання вала шнека під навантаженням. Вихідний тихохідний вал редуктора з'єднується з валом гвинтового конвеєра за допомогою спеціальної запобіжної муфти зі зрізним штифтом, яка призначена для механічного захисту трансмісії у випадку раптового заклинювання шнека сторонніми предметами.

У якості джерела механічної енергії в базовій схемі застосовано трифазний асинхронний електродвигун загальнопромислового виконання серії 4А (модель 4А112М4У3). Вибір саме цього типу електричної машини історично зумовлений її високою надійністю, простотою конструкції, відсутністю щітково-колекторного вузла та невибагливістю в обслуговуванні. Двигун має повністю закрите обдувне виконання (ступінь захисту IP54), що дозволяє йому надійно працювати в умовах високої концентрації зернового пилу без ризику пошкодження обмоток. Номінальна потужність двигуна становить 5.5 кВт при синхронній частоті обертання магнітного поля 1500 об/хв. Загальний вигляд встановленого електродвигуна наведено на рисунку 1.3.

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						13
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		



Рисунок 1.5 Загальний вигляд електродвигуна 4A112M4Y3

Керування цим двигуном у базовій системі реалізовано за допомогою найпростішої релейно-контакторної апаратури. Електрична схема управління

передбачає виключно два стани: двигун включений у мережу або відключений від неї. Запуск електропривода здійснюється оператором з кнопочового поста управління шляхом подачі напруги на котушку магнітного пускача, силові контакти якого здійснюють пряме підключення обмоток статора двигуна до промислової трифазної мережі змінного струму з лінійною напругою 380 В.

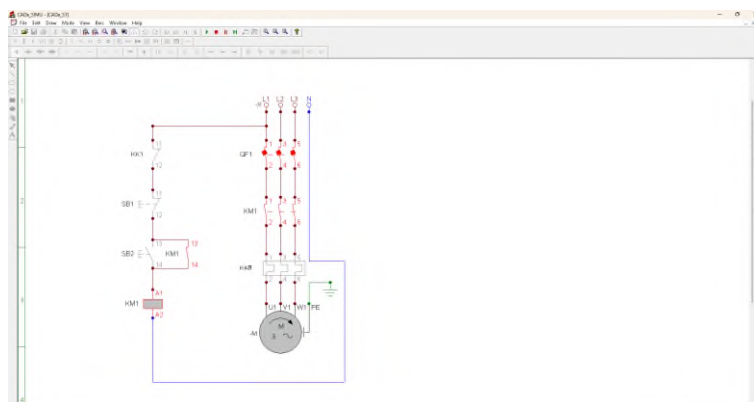


Рисунок 1.5 - Принципова електрична схема базового нерегульованого електропривода конвеєра.

Функції захисту в існуючій схемі зведені до мінімуму. Захист силових кіл та мережі від струмів короткого замикання забезпечується триполюсним автоматичним вимикачем з електромагнітним розчеплювачем. Захист самого електродвигуна від тривалих теплових перевантажень, що виникають при роботі заклиненого або перевантаженого конвеєра, покладено на електротеплове реле на базі біметалевих пластин, яке при досягненні струмом критичного значення розриває коло живлення котушки контактора.

Незважаючи на високу експлуатаційну надійність елементної бази, така архітектура електропривода володіє низкою фундаментальних недоліків, що знижують загальну ефективність технологічного процесу:

По-перше, прямий пуск асинхронного двигуна супроводжується величезним кидком струму, який у 5-7 разів перевищує номінальне значення. Такі струмові перевантаження спричиняють значні падіння напруги в локальній електромережі підприємства, що може негативно вплинути на роботу чутливої мікропроцесорної автоматики суміжних ліній, а також призводять до інтенсивного термічного старіння ізоляції обмоток самого двигуна.

По-друге, електромагнітний момент двигуна при прямому підключенні наростає стрибкоподібно і може вдвічі перевищувати номінальний крутний момент. Цей ударний імпульс передається через муфти та редуктор на вал конвеєра. Особливо руйнівними є наслідки пуску конвеєра «під завалом», коли після аварійної зупинки жолоб залишається повністю заповненим зерном. Регулярні динамічні удари призводять до прискореного зносу зубчастих передач, руйнування підшипникових вузлів та втоми металу валів.

По-третє, існуюча система принципово не здатна регулювати швидкість обертання гвинта. Електродвигун завжди обертається з частотою, близькою до номінальної, споживаючи при цьому фіксований обсяг активної та реактивної потужності. У моменти, коли потік зерна з бункера зменшується, конвеєр продовжує працювати на повну потужність, неефективно витрачаючи

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						15
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

електроенергію на переміщення повітря та подолання внутрішнього тертя механізму.

Таким чином, детальний аналіз існуючого електропривода свідчить про те, що нерегульована релейно-контакторна схема вичерпала свій ресурс ефективності. Для забезпечення надійної, довговічної та енергозберігаючої роботи гвинтового конвеєра в сучасних умовах необхідна глибока модернізація його електричної частини шляхом впровадження систем плавного пуску та частотного регулювання швидкості.

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						16
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

2 РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1 Вимоги до автоматизованого електропривода гвинтового конвеєра

Будь-який процес інженерного проектування або глибокої модернізації складних електромеханічних комплексів об'єктивно повинен розпочинатися з ретельного та всебічного формулювання технічних, технологічних та експлуатаційних вимог, які висуваються до приводної системи з боку робочого механізму. Правильно сформульовані вимоги є фундаментом для подальшого вибору типу електродвигуна, розрахунку його номінальної потужності, вибору структури силової перетворювальної частини та синтезу алгоритмів системи автоматичного керування. Електропривод у сучасному розумінні розглядається не ізольовано, а як невід'ємна підсистема єдиного технологічного агрегату, тому всі його характеристики повинні бути жорстко підпорядковані кінцевій меті - забезпеченню надійного, енергоефективного та безпечного процесу транспортування матеріалу.

Об'єктом нашого дослідження виступає стаціонарний гвинтовий конвеєр сипучих матеріалів КВ-320, який з точки зору загальної теорії електропривода класифікується як механізм із тривалим режимом роботи (режим S1 згідно з класифікацією) та переважно постійним статичним моментом опору. Особливість таких механізмів полягає в тому, що їхній момент опору практично не залежить від кутової швидкості обертання робочого органу, але є прямо пропорційним масі матеріалу, що знаходиться в жолобі в конкретний момент часу, та залежить від коефіцієнтів зовнішнього і внутрішнього тертя сипучої маси. З огляду на ці фізико-механічні фактори, до модернізованого електропривода висувається комплекс специфічних вимог, які можна умовно розділити на кілька взаємопов'язаних груп.

Перша і найголовніша група вимог стосується динаміки пускових режимів. Специфіка роботи елеваторного обладнання полягає в тому, що технологічні та аварійні зупинки конвеєра можуть відбуватися в будь-який момент часу, у тому числі тоді, коли жолоб повністю заповнений зерном. У таких ситуаціях виникає

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		17

режим пуску «під завалом». При цьому, окрім подолання стандартного статичного моменту тертя та динамічного моменту інерції обертових мас привода і шнека, двигун повинен подолати значні сили тертя спокою злежаного матеріалу. Відповідно, електропривод повинен забезпечувати пусковий крутний момент, який гарантовано перевищує номінальний момент опору механізму, для безперешкодного рушання системи з місця. Водночас цей пуск має відбуватися максимально плавно, з обмеженням похідної моменту в часі. Це критично важливо для запобігання виникненню пружних коливань у довгому валу шнека, врізанню запобіжних штифтів у муфтах та руйнуванню зубчастих зачеплень редуктора.

Друга група вимог стосується статичних і динамічних показників привода у робочому (сталому) режимі експлуатації. Для забезпечення рівномірного та суворо дозованого потоку зернової маси до наступних ланок технологічного ланцюга кутова швидкість обертання шнека повинна залишатися максимально стабільною незалежно від випадкових коливань навантаження на валу. Отже, механічна характеристика системи в робочій зоні має бути жорсткою. Зміна статичного моменту внаслідок нерівномірної подачі зерна з бункера не повинна викликати відчутного просідання швидкості, оскільки це призведе до порушення ритмічності всього технологічного процесу.

Третя група вимог визначає параметри регулювання координат електропривода. Для оптимізації вантажопотоків та усунення режимів недовантаження конвеєра система повинна мати можливість цілеспрямованої зміни продуктивності. За технологічними нормами, діапазон регулювання кутової швидкості для подібних живильних механізмів повинен становити не менше ніж 1:5 вниз від номінальної (базової) швидкості. При цьому, оскільки конвеєр є механізмом із постійним моментом опору, регулювання має здійснюватися в зоні постійного допустимого моменту двигуна без розриву потоку потужності.

Четверта група вимог безпосередньо пов'язана з умовами навколишнього середовища. Робоча зона гвинтового конвеєра характеризується присутністю

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		18

великої кількості абразивного та вибухонебезпечного зернового пилу. Тому силовий агрегат повинен мати повністю закрите обдуже виконання з класом захисту оболонки не нижче IP54.

Узагальнюючи вищевикладене, сформульований комплекс технологічних та експлуатаційних вимог є суворим критерієм для оцінки ефективності приводної системи. Для того, щоб визначити, наскільки існуюча нерегульована система електропривода здатна задовольнити ці вимоги, та обґрунтувати напрямки її модернізації, необхідно виконати розгорнутий комплекс математичних розрахунків. Лише на основі детального аналізу кінематичних параметрів, енергетичних навантажень та побудови механічних характеристик можна зробити об'єктивний висновок щодо працездатності базової схеми та довести необхідність переходу до більш досконалих методів керування.

2.2 Розрахунок кінематичної схеми привода шнека

Кінематична схема електропривода являє собою сукупність механічних передавальних ланок, призначених для передачі крутного моменту від вала приводного електродвигуна до виконавчого органу робочої машини (гвинта конвеєра) з одночасним узгодженням їхніх кутових швидкостей. Оскільки стандартні промислові асинхронні двигуни мають відносно високу частоту обертання, а технологічний процес транспортування зернових культур вимагає низьких швидкостей для запобігання травмуванню продукту, невід'ємним елементом кінематичного ланцюга є знижувальний редуктор.

У досліджуваному конвеєрі KB-320 передача механічної енергії здійснюється за наступним ланцюгом: ротор електродвигуна з'єднується з вхідним швидкохідним валом циліндричного двоступеневого редуктора за допомогою пружної втулково-пальцевої муфти. Вихідний тихохідний вал редуктора жорстко з'єднаний із валом гвинта через запобіжну муфту зі зрізним штифтом.

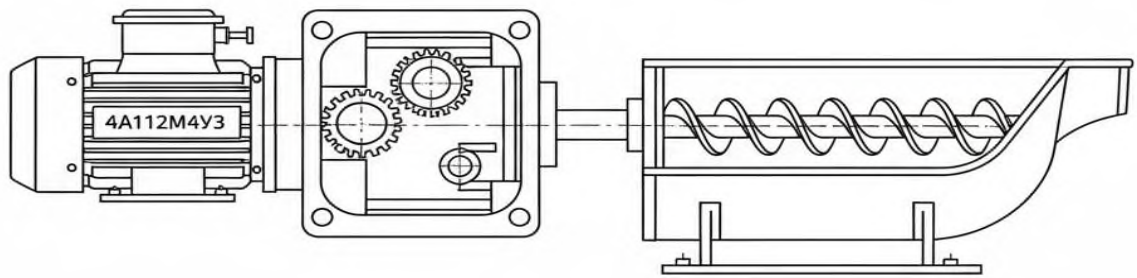


Рисунок 2.1 - Кінематична схема електромеханічної системи конвеєра.

Вихідними даними для виконання кінематичного розрахунку є номінальна паспортна частота обертання базового електродвигуна 4A112M4Y3, яка становить $n_{\text{ном}} = 1445 \text{ хв}^{-1}$ а задана технологічна частота обертання вала шнека $n_{\text{шн}} = 125 \text{ хв}^{-1}$

Визначимо загальне передавальне число кінематичного ланцюга:

$$i_{\text{заг}} = \frac{n_{\text{ном}}}{n_{\text{шн}}} = \frac{1445}{125} = 11.56 (2.1)$$

Де $n_{\text{ном}}$ - номінальна частота обертання двигуна, $n_{\text{ном}} = 1445 \text{ хв}^{-1}$

$n_{\text{шн}}$ - частота обертання вала шнека, $n_{\text{шн}} = 125 \text{ хв}^{-1}$

Для виконання подальших динамічних розрахунків визначимо номінальну кутову швидкість ротора електродвигуна:

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30} = \frac{3.14 \cdot 1445}{30} = 151.24 \text{ рад/с} (2.2)$$

Де π - математична константа, $\pi = 3.14$

Кутова швидкість обертання робочого органу (вала шнека) визначається

аналогічно:
$$\omega_{\text{шн}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{шн}}}{30} = \frac{3.14 \cdot 125}{30} = 13.08 \text{ рад/с} (2.3)$$

Перевірка загального передавального числа через співвідношення кутових швидкостей:

$$i_{\text{заг}} = \frac{\omega_{\text{ном}}}{\omega_{\text{шн}}} = \frac{151.24}{13.08} = 11.56(2.4)$$

Для визначення потужності, яку необхідно підвести до вала двигуна, розраховується загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) механічної передачі. Він дорівнює добутку коефіцієнтів корисної дії всіх послідовно з'єднаних ланок кінематичного ланцюга.

Згідно з паспортними даними обладнання, приймаються наступні значення: ККД двоступеневого циліндричного зубчастого редуктора $\eta_{\text{ред}} = 0.96$; КД пружної муфти $\eta_{\text{м1}} = 0.99$; ККД запобіжної муфти $\eta_{\text{м2}} = 0.99$; ККД проміжної підвісної опори вала шнека $\eta_{\text{оп}} = 0.98$.

Розрахуємо загальний ККД передачі:

$$\eta_{\text{заг}} = \eta_{\text{ред}} \cdot \eta_{\text{м1}} \cdot \eta_{\text{м2}} \cdot \eta_{\text{оп}} = 0.96 \cdot 0.99 \cdot 0.99 \cdot 0.98 = 0.92 (2.5)$$

Де $\eta_{\text{ред}}$ - ККД редуктора, $\eta_{\text{ред}} = 0.96$

$\eta_{\text{м1}}$ - КД пружної муфти $\eta_{\text{м1}} = 0.99$

$\eta_{\text{м2}}$ - ККД запобіжної муфти; $\eta_{\text{м2}} = 0.99$

$\eta_{\text{оп}}$ - ККД проміжної опори, $\eta_{\text{оп}} = 0.98$.

Отримані значення передавального числа $i_{\text{заг}} = 11.56$ та загального ККД $\eta_{\text{заг}} = 0.92$ є базовими параметрами, що будуть використані для розрахунку статичних моментів опору та перевірки обраного двигуна за потужністю у наступних підрозділах роботи.

2.3 Розрахунок потужності і вибір двигуна електропривода

Основою для правильного вибору електродвигуна та подальшого синтезу системи керування є точний розрахунок навантажувальної діаграми або визначення статичної потужності на робочому органі механізму. Правильний вибір потужності двигуна має вирішальне значення: встановлення двигуна заниженої потужності призведе до його систематичного перегрівання,

передчасного старіння ізоляції та неможливості запуску конвеєра під навантаженням, тоді як вибір двигуна із занадто великим запасом спричинить нераціональні капітальні витрати, роботу з низьким коефіцієнтом корисної дії та зниженим коефіцієнтом потужності.

Гвинтовий конвеєр належить до механізмів із тривалим режимом роботи (режим S1 за класифікацією ГОСТ та МЕК), для якого характерне незмінне навантаження протягом тривалого часу, достатнього для досягнення електродвигуном сталої температури нагріву. Потужність, що споживається робочим органом шнека, витрачається на подолання сил зовнішнього тертя сипучого матеріалу об внутрішні стінки нерухомого жолоба, сил внутрішнього тертя між частинками самого матеріалу, подолання тертя в підшипникових вузлах, а також на виконання корисної роботи з підйому маси вантажу, оскільки траса конвеєра має кут нахилу до горизонту.

Визначимо розрахункову статичну потужність на валу гвинта за загальноприйнятою емпіричною формулою для транспортувальних машин даного типу:

$$P_{\text{шн}} = \frac{Q \cdot L \cdot w}{367} \quad (2.6)$$

де Q - задана продуктивність гвинтового конвеєра, $Q = 30, \text{т/год}$;

L - довжина траси транспортування матеріалу, $L = 8.0, \text{м}$;

w - узагальнений коефіцієнт опору руху матеріалу, який для зернових мас приймається рівним $w = 4.0$.

Підставивши вихідні дані у рівняння, отримаємо:

$$P_{\text{шн}} = \frac{30 \cdot 8.0 \cdot 4.0}{367} = 2,62 \text{ кВт} \quad (2.7)$$

Отримана величина є корисною механічною потужністю безпосередньо на робочому органі. Однак для вибору електродвигуна необхідно визначити потужність на його валу з урахуванням усіх втрат енергії у механічній трансмісії.

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						22
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Використовуючи знайдене у попередньому підрозділі значення загального коефіцієнта корисної дії передачі, розрахуємо необхідну потужність на валу приводного двигуна:

$$P_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{шн}}}{\eta_{\text{заг}}} (2.8)$$

Де $\eta_{\text{заг}}$ - загальний коефіцієнт корисної дії кінематичного ланцюга, $\eta_{\text{заг}} = 0,92$

Тоді розрахункова статична потужність двигуна становитиме:

$$P_{\text{дв}} = \frac{2.62}{0.92} = 2.85, \text{кВт} (2.9)$$

Для забезпечення надійної роботи електропривода в умовах експлуатаційних перевантажень - зокрема, при транспортуванні зерна з підвищеною вологістю, що суттєво збільшує коефіцієнт тертя, або під час пуску механізму після тривалого простою - номінальна потужність електродвигуна визначається з урахуванням нормативного коефіцієнта запасу. Відповідно до галузевих норм проектування транспортних систем агропромислового комплексу, величина коефіцієнта запасу потужності для гвинтових конвеєрів регламентується в діапазоні від 1.2 до 1.3. З огляду на високу ймовірність виникнення важких режимів пуску «під завалом», до подальшого розрахунку приймаємо обґрунтоване значення $K_3 = 1.25$.

Визначимо мінімально необхідну каталожну потужність електродвигуна:

$$P_{\text{кат}} \geq P_{\text{дв}} \cdot K_3 (2.10)$$

$$P_{\text{кат}} \geq 2.85 \cdot 1.25 = 3.56, \text{кВт} (2.11)$$

На існуючому базовому конвеєрі заводом-виробником встановлено трифазний асинхронний електродвигун серії 4А моделі 4А112М4У3. Його номінальна паспортна потужність становить $P_{\text{ном}} = 5.5 \text{ кВт}$, що повністю задовольняє розрахункову умову ($5.5, \text{кВт} > 3.56, \text{кВт}$) Оскільки встановлений

двигун має належний ступінь захисту оболонки (IP54) і знаходиться у технічно справному стані, з метою оптимізації капітальних витрат на модернізацію та уникнення необхідності реконструкції посадкових місць станини, приймається рішення зберегти існуючий електродвигун у якості силового агрегату для модернізованої системи.

Перевіримо обраний двигун за умовами нагрівання. Оскільки розрахунковий режим роботи механізму є тривалим незмінним (S1), критерієм перевірки за нагріванням є виконання умови, за якої розрахункова статична потужність навантаження не перевищує номінальну потужність двигуна:

$$P_{\text{дв}} \leq P_{\text{ном}} \quad (2.12)$$

Де $P_{\text{дв}}$ - розрахункова статична потужність на валу двигуна, $P_{\text{дв}} = 2.85$ кВт;

$P_{\text{ном}}$ - Номінальна потужність обраного двигуна $P_{\text{ном}} = 5.5$ кВт.

Підставивши значення, отримаємо: $2.85 \leq 5.5$ (2.13)

Умова перевірки за нагріванням виконується із значним запасом, що гарантує відсутність перегріву обмоток статора під час безперервної роботи конвеєра при номінальному навантаженні.

Для подальшої побудови механічних характеристик та перевірки двигуна за перевантажувальною здатністю необхідно розрахувати базові крутні моменти системи. Визначимо номінальний крутний момент електродвигуна 4A112M4Y3 за паспортними даними:

$$M_{\text{ном}} = \frac{9550 \cdot P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = \frac{9550 \cdot 5.5}{1445} = 36.35 \text{ Нм} \quad (2.14)$$

Де $P_{\text{ном}}$ - номінальна потужність електродвигуна, $P_{\text{ном}} = 5.5$ кВт

$n_{\text{ном}}$ - номінальна частота обертання ротора, $n_{\text{ном}} = 1445, \text{ хв}^{-1}$.

Визначимо розрахунковий статичний момент опору робочої машини, зведений до вала електродвигуна:

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		24

$$M_c = \frac{9550 \cdot P_{\text{дв}}}{n_{\text{ном}}} = \frac{9550 \cdot 2.85}{1445} = 18.84 \text{ Нм} (2.15)$$

Де $P_{\text{дв}}$ - розрахункова статична потужність на валу двигуна, $P_{\text{дв}} = 2,85$ кВт

Згідно з технічним каталогом, кратність максимального моменту для двигуна даної серії становить $\lambda = 2.2$. Розрахуємо максимальний (перекидний) момент, який здатен розвинути обраний двигун:

$$M_{\text{max}} = M_{\text{ном}} \cdot \lambda = 36.35 \cdot 2.2 = 79.97 \text{ Нм} (2.16)$$

Де λ - кратність максимального моменту електродвигуна, $\lambda = 2.2$.

Виконаємо перевірку електродвигуна за перевантажувальною здатністю. Двигун повинен гарантовано долати можливі пікові технологічні навантаження без зупинки (перекидання). Перевірка здійснюється за наступною умовою:

$$M_{\text{max}} \geq M_c \cdot K_m (2.17)$$

Де K_m - коефіцієнт механічного перевантаження конвеєра, який для механізмів транспортування зерна приймається рівним 1.5.

Підставивши розраховані значення, отримаємо:

$$79.97 \geq 18.84 \cdot 1.5 \text{ або } 79.97 \geq 28.26 \text{ Нм} (2.18)$$

Умова перевірки виконується, що підтверджує достатній запас стійкості двигуна до короточасних навантажень.

Оцінимо ступінь фактичного завантаження електродвигуна за потужністю у встановленому технологічному режимі:

$$K_{\text{зав}} = \frac{P_{\text{дв}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{2.85}{5.5} = 0.52 (2.19)$$

Де $K_{\text{зав}}$ — коефіцієнт завантаження двигуна.

Отримане значення коефіцієнта завантаження вказує на те, що у сталому

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		25

режимі роботи при номінальній продуктивності електродвигун використовується лише на 52% від своєї встановленої потужності. При експлуатації нерегульованого електропривода (пряме живлення від мережі) така недовантаженість призводить до суттєвого погіршення енергетичних показників системи: значного зниження коефіцієнта потужності та погіршення коефіцієнта корисної дії за рахунок високої частки реактивного струму намагнічування. Це підтверджує доцільність впровадження частотного регулювання, оскільки перетворювач частоти дозволить не лише реалізувати плавний пуск, а й автоматично оптимізувати напругу живлення статора відповідно до фактичного моменту навантаження, що забезпечить суттєвий енергозберігаючий ефект при роботі конвеєра КВ-320 у реальних виробничих циклах.

2.4 Розрахунок і побудування механічної характеристики двигуна

Побудова природної механічної характеристики $M = f(s)$ обраного електродвигуна здійснюється за методом характерних точок.

$$s_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_0} \quad (2.20)$$

Де n_0 - синхронна частота обертання магнітного поля статора, $n_0 = 1500, \text{хв}^{-1}$;

$n_{\text{ном}}$ - номінальна частота обертання ротора, $n_{\text{ном}} = 1445, \text{хв}^{-1}$.

Підставивши числові значення, отримаємо:

$$s_{\text{ном}} = \frac{1500 - 1445}{1500} = 0.0367 \quad (2.21)$$

Для побудови робочої кривої необхідно розрахувати критичне ковзання:

$$s_k = s_{\text{ном}} \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) \quad (2.22)$$

Де λ - кратність максимального моменту електродвигуна, $\lambda = 2.2$.

$$s_k = 0.0367 \cdot (2.2 + \sqrt{2.2^2 - 1}) = 0.152(2.23)$$

У пусковому режимі, в момент підключення до живильної мережі нерухомого двигуна, пусковий момент розраховується за каталожною кратністю:

$$M_{\Pi} = M_{\text{ном}} \cdot k_{\Pi}(2.24)$$

Де $M_{\text{ном}}$ - номінальний крутний момент електродвигуна, $M_{\text{ном}} = 36.35 \text{ Нм}$;

k_{Π} - кратність пускового моменту, $k_{\Pi} = 2.0$.

$$M_{\Pi} = 36.35 \cdot 2.0 = 72.7, \text{Нм}(2.25)$$

За обчисленими координатами (режим ідеального холостого ходу, номінальний, критичний та пусковий режими) апроксимується крива механічної характеристики. На цій же координатній площині відкладається пряма лінія статичного моменту опору конвеєра, що дорівнює 18.84 Нм. Точка перетину цих характеристик визначає координати усталеного робочого режиму.

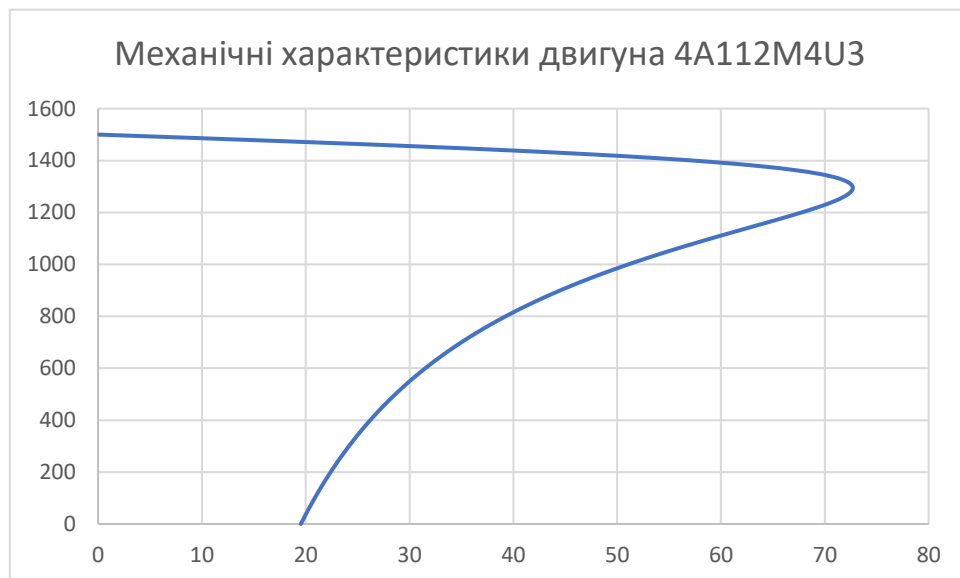


Рисунок 2.2 - Природна механічна характеристика асинхронного двигуна 4A112M4U3 та момент опору гвинтового конвеєра.

2.5 Розрахунок і вибір кабелю живлення електропривода

Вибір перерізу жил силового кабелю для живлення електродвигуна

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		27

здійснюється за умовою допустимого нагрівання тривалим розрахунковим струмом та перевіряється за допустимою втратою напруги в лінії. Правильний вибір перерізу забезпечує термічну стійкість ізоляції провідників та стабільну роботу електродвигуна з номінальним моментом.

Для розрахунку перерізу необхідно визначити номінальний струм статора електродвигуна:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} \quad (2.26)$$

Де $P_{\text{ном}}$ - номінальна активна потужність двигуна, $P_{\text{ном}} = 5.5$ кВт;

$U_{\text{ном}}$ - номінальна лінійна напруга живильної мережі, $U_{\text{ном}} = 380$ В;

$\cos \varphi$ - номінальний коефіцієнт потужності двигуна, $\cos \varphi = 0.86$;

η - номінальний коефіцієнт корисної дії двигуна, $\eta = 0.85$.

Підставивши паспортні дані двигуна 4A112M4Y3, отримаємо розрахунковий струм лінії:

$$I_{\text{ном}} = \frac{5.5 \cdot 1000}{1.73 \cdot 380 \cdot 0.86 \cdot 0.85} = 11.45 \text{ А} \quad (2.27)$$

Згідно з вимогами ПУЕ до електроустановок, що експлуатуються в умовах підвищеної запиленості зернопереробних підприємств, до встановлення приймається силовий кабель із мідними жилами марки ВВГнг-LS. Для трифазного живлення з окремим захисним провідником обираємо чотирижильний кабель.

За таблицями допустимих струмових навантажень для мідних провідників при відкритому прокладанні обираємо переріз $S = 2.5 \text{ мм}^2$. Допустимий тривалий струм для даного перерізу становить $I_{\text{доп}} = 25.0 \text{ А}$.

Перевіримо обраний кабель за умовою нагрівання:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{ном}} \quad (2.28)$$

$$25.0 \geq 11.45 \quad (2.29)$$

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						28
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Обраний переріз задовольняє умові нагрівання. Для перевірки за допустимою втратою напруги приймаємо орієнтовну довжину кабельної лінії від силової шафи до двигуна конвеєра $L = 30.0$ м.

Розрахуємо абсолютну втрату напруги в лінії:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ном}} \cdot L \cdot \cos \varphi}{\gamma \cdot S} \quad (2.30)$$

Де L - довжина кабельної траси, $L = 30$ м;

γ - питома електрична провідність міді, $\gamma = 57.0 \text{ м}/(\Omega \cdot \text{мм}^2)$

S - переріз жил кабелю, $S = 2.5 \text{ мм}^2$.

$$\Delta U = \frac{1.73 \cdot 11.45 \cdot 30.0 \cdot 0.86}{57.0 \cdot 2.5} = 3.58 \text{ В} \quad (2.31)$$

Визначимо відносну втрату напруги у відсотках від номінальної:

$$\Delta U_{\text{відн}} = \frac{\Delta U \cdot 100}{U_{\text{ном}}} \quad (2.32)$$

$$\Delta U_{\text{відн}} = \frac{3.58 \cdot 100}{380.0} = 0.94$$

Отримана втрата напруги 0.94% не перевищує максимально допустимого значення 5.0%. Кабель ВВГнг-LS 4 × 2.5 повністю відповідає технічним вимогам за обома критеріями.

2.6 Розрахунок і вибір апаратів захисту і управління електропривода

Для захисту електродвигуна від струмів короткого замикання, тривалих технологічних перевантажень та для здійснення операцій пуску і зупинки в існуючій нерегульованій схемі необхідно розрахувати та обрати автоматичний вимикач, електромагнітний контактор та теплове реле.

Вибір автоматичного вимикача здійснюється за номінальним струмом та перевіряється за струмом спрацьовування електромагнітного розчеплювача

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						29
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

(струмом відсічки) для уникнення хибних відключень під час прямого пуску двигуна. Умова вибору за номінальним струмом:

$$I_{\text{ном.авт}} \geq I_{\text{ном}} \quad (2.34)$$

Де $I_{\text{ном}}$ - розрахунковий номінальний струм статора електродвигуна, $I_{\text{ном}} = 11.45 \text{ A}$.

Зі стандартного ряду обираємо автоматичний вимикач із найближчим більшим номінальним струмом $I_{\text{ном.авт}} = 16.0 \text{ A}$.

Струм спрацьовування електромагнітного розчеплювача перевіряється за умовою:

$$I_{\text{відс}} \geq 1.25 \cdot I_{\text{пуск}} \quad (2.35)$$

Де $I_{\text{пуск}}$ - пусковий струм електродвигуна при прямому підключенні до мережі. Пусковий струм розраховується через каталожну кратність пускового струму $k_I = 7.0$:

$$I_{\text{пуск}} = I_{\text{ном}} \cdot k_I \quad (2.36)$$

$$I_{\text{пуск}} = 11.45 \cdot 7.0 = 80.15 \text{ A} \quad (2.37)$$

Підставивши значення в умову перевірки, отримаємо мінімально необхідний струм відсічки:

$$I_{\text{відс}} \geq 1.25 \cdot 80.15 = 100.18 \text{ A} \quad (2.38)$$

Обираємо триполюсний автоматичний вимикач **Acti9 iC60N** з характеристикою відключення типу «С». Струм миттєвого відключення для характеристики «С» становить від 5 до 10 $I_{\text{ном.авт}}$ (від 80 до 160 А), що забезпечує надійний захист від коротких замикань та безперешкодне проходження пускового струму.

Вибір електромагнітного контактора здійснюється за номінальною напругою котушки управління та за умовою відповідності струму головних контактів

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						30
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

номінальному струму навантаження:

$$I_{\text{ном.к}} \geq I_{\text{ном}} \quad (2.39)$$

Обираємо малогабаритний електромагнітний контактор змінного струму серії **TeSys D** моделі **LC1D12**. Його номінальний робочий струм становить 18.0 А, що задовольняє розрахункову умову ($18.0 \text{ А} \geq 11.45 \text{ А}$). Напруга котушки управління приймається 230 В для живлення від фазної напруги мережі.

Вибір теплового реле для захисту електродвигуна від струмів перевантаження (наприклад, при заклинюванні шнека) здійснюється за струмом уставки, який повинен дорівнювати номінальному струму двигуна:

$$I_{\text{уст}} = I_{\text{ном}} = 11.45 \text{ А} \quad (2.40)$$

2.7 Опис існуючої релейно-контакторної схеми управління

Існуюча базова система управління електроприводом гвинтового конвеєра реалізована на класичній релейно-контакторній апаратурі і забезпечує нерегульований прямий пуск асинхронного електродвигуна від промислової мережі змінного струму.

Апаратна конфігурація схеми управління включає автоматичний вимикач (QF) для захисту силового ланцюга від струмів короткого замикання, електромагнітний контактор (KM) для комутації фазних обмоток статора та електротеплове реле (KK) для захисту від тривалих струмових перевантажень. Оперативне керування здійснюється за допомогою кнопкового поста з розмикаючою кнопкою «Стоп» (SB1) та замикаючою кнопкою «Пуск» (SB2).

При подачі напруги живлення шляхом включення автоматичного вимикача QF схема переходить у стан готовності. Натискання кнопки SB2 «Пуск» замикає коло живлення котушки електромагнітного контактора KM. Контактор спрацьовує, замикаючи свої головні силові контакти у ланцюзі статора електродвигуна, що призводить до його прямого пуску. Одночасно замикається допоміжний блок-контакт KM, який паралельно шунтує кнопку SB2,

забезпечуючи електричне самопідхоплення котушки контактора після відпускання кнопки оператором.

Для зупинки конвеєра оператор натискає розмикаючу кнопку SB1 «Стоп». Це розриває ланцюг живлення котушки контактора, його головні контакти під дією зворотної пружини розмикаються, і електродвигун відключається від живильної мережі, зупиняючись на вибігу. У разі виникнення технологічного перевантаження, наприклад, при заклинюванні шнекового гвинта, зростає струм у силових лініях. Якщо це перевищення струму триває довше розрахункового часу, спрацьовують біметалеві елементи теплового реле КК, які розмикають свій керуючий контакт у ланцюзі котушки контактора, ініціюючи автоматичне аварійне відключення привода.

2.8 Обґрунтування доцільності застосування частотного електропривода

Аналіз режимів роботи базової релейно-контакторної системи виявляє суттєві технічні та експлуатаційні недоліки, пов'язані з прямим пуском асинхронного двигуна та його роботою в умовах постійного недовантаження.

Першим і найвагомішим фактором є високі значення перехідних струмів. При прямому підключенні до мережі пусковий струм статора багаторазово перевищує номінальний:

$$I_{\text{пуск. прям}} = I_{\text{ном}} \cdot kI \quad (2.41)$$

Де $I_{\text{ном}}$ - номінальний струм статора, $I_{\text{ном}} = 11.45 \text{ A}$;

kI - каталожна кратність пускового струму, $kI = 7.0$.

$$I_{\text{пуск. прям}} = 11.45 \cdot 7.0 = 80.15 \text{ A} \quad (2.42)$$

Такі кидки струму викликають просадки напруги в цеховій розподільчій мережі та призводять до прискореного теплового зносу ізоляції обмоток двигуна. Застосування перетворювача частоти дозволяє формувати плавний розгін із заданим темпом, обмежуючи пусковий струм на рівні 150% від номінального:

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						32
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$I_{\text{пуск. пч}} = I_{\text{ном}} \cdot 1.5 = 11.45 \cdot 1.5 = 17.18 \text{ А (2.43)}$$

Впровадження частотного керування знижує пускові струми майже у 4.7 рази, що кардинально покращує електромагнітну сумісність привода з живильною мережею.

Другим фактором є механічна жорсткість прямого пуску. Як було показано при розрахунку механічних характеристик, надлишковий пусковий момент (72.7 Нм) майже в чотири рази перевищує статичний момент опору конвеєра (18.84 Нм). Миттєве прикладання такого зусилля до нерухомого робочого органу створює жорсткі динамічні удари, які викликають інтенсивне зношування зубчастих зачеплень редуктора, руйнування пальців пружної муфти та крутильні деформації вала шнека. Перетворювач частоти повністю усуває цю проблему за рахунок алгоритмічного формування S-подібних рамп розгону та гальмування.

Третім технічним аргументом є низький коефіцієнт завантаження двигуна ($K_{\text{зав}} = 0.52$). При роботі від промислової мережі нерегульований привод у такому режимі має низький коефіцієнт потужності ($\cos \phi$) та підвищене споживання реактивної енергії на створення магнітного потоку. Сучасні перетворювачі частоти оснащені функцією автоматичної оптимізації енергоспоживання (векторне керування струмом намагнічування). Мікропроцесорна система ПЧ знижує напругу живлення статора пропорційно до фактичного моменту навантаження, що суттєво підвищує загальний коефіцієнт корисної дії електромеханічної системи в номінальному технологічному режимі.

Сукупність наведених технічних переваг повністю обґрунтовує доцільність заміни базової релейно-контакторної апаратури на систему керованого електропривода на базі перетворювача частоти.

Розділ 3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА ПЕОМ

3.1 Постановка задачі моделювання роботи електропривода на ПЕОМ

Сучасний етап проектування та модернізації електромеханічних систем передбачає обов'язкове використання засобів імітаційного моделювання для всебічного аналізу поведінки системи у різних режимах роботи. Моделювання дозволяє ще на етапі розробки оцінити ефективність прийнятих технічних рішень, не вдаючись до дорогих натурних експериментів на реальному обладнанні. Метою даного розділу мною обрано дослідження динамічних та статичних характеристик модернізованого електропривода гвинтового конвеєра КВ-320. Для реалізації поставленої мети я використовую пакет візуального програмування MATLAB у середовищі Simulink, який дозволяє з високою точністю відтворити фізичні процеси в асинхронному двигуні та системі частотного керування.

Для досягнення поставленої мети мною передбачено розв'язання комплексу науково-технічних завдань. Насамперед здійснюється розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна 4А112М4У3 на основі його паспортних даних для створення адекватної математичної моделі. Далі виконується розробка імітаційної моделі для дослідження прямого пуску двигуна від мережі з метою оцінки рівнів пускових струмів та ударних моментів, що діють на механічну частину конвеєра. На базі отриманих даних проводиться побудова та аналіз природної механічної характеристики двигуна у координатах кутової швидкості та моменту.

Наступним кроком є моделювання роботи електропривода у системі «перетворювач частоти – асинхронний двигун» для дослідження режимів регулювання швидкості. В рамках цього етапу досліджується сімейство механічних характеристик при зміні частоти живильної напруги у діапазоні від 50 до 100 Гц, що дозволяє проаналізувати роботу конвеєра у зоні послаблення магнітного поля. Підсумковим завданням є проведення порівняльного аналізу отриманих осцилограм перехідних процесів для підтвердження техніко-економічної доцільності впровадження частотного регулювання. Результати

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						34
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

моделювання стануть основою для формування остаточних висновків щодо якості перехідних процесів, стабільності роботи привода під навантаженням та загальної надійності модернізованої системи керування конвеєром.

3.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення двигуна електропривода

Для створення адекватної математичної моделі асинхронного двигуна 4A112M4Y3 у середовищі MATLAB/Simulink необхідно виконати перерахунок його паспортних даних у параметри Т-подібної схеми заміщення. Блок Asynchronous Machine SI Units вимагає введення активних та індуктивних параметрів у фізичних одиницях вимірювання. Розрахунок базується на номінальних характеристиках електричної машини, визначених у попередніх розділах: номінальна потужність $P_{\text{ном}} = 5.5 \text{ кВт}$, номінальна лінійна напруга $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$ (фазна напруга $U_{\phi} = 220 \text{ В}$), номінальний струм $I_{\text{ном}} = 11.45 \text{ А}$, синхронна частота обертання $n_0 = 1500 \text{ об/хв}$, номінальна частота обертання $n_{\text{ном}} = 1445 \text{ об/хв}$, коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 0.86$ та кратність пускового струму $k_i = 7.0$.

Першим етапом ідентифікації параметрів є визначення номінального ковзання двигуна у робочому режимі:

$$s_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_0} = \frac{1500 - 1445}{1500} = 0.0367$$

Пусковий струм статора при прямому підключенні до мережі визначається за відомою паспортною кратністю:

$$I_{\pi} = I_{\text{ном}} \cdot k_i = 11.45 \cdot 7.0 = 80.15 \text{ А}$$

Знаючи величину пускового струму, визначаємо повний опір короткого замикання фази двигуна:

$$Z_k = \frac{U_{\phi}}{I_{\pi}} = \frac{220}{80.15} = 2.74 \text{ Ом}$$

Зведений активний опір ротора обчислюється за спрощеною методикою через номінальне ковзання та параметри номінального режиму:

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						35
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$R'_2 = s_{\text{НОМ}} \cdot \frac{U_{\phi}}{I_{\text{НОМ}}} \cdot \cos \varphi = 0.0367 \cdot \frac{220}{11.45} \cdot 0.86 = 0.606 \text{ Ом}$$

Активний опір статора для двигунів даного діапазону потужностей (до 10 кВт) приймається пропорційним зведеному опору ротора з емпіричним коефіцієнтом 1.2:

$$R_1 = 1.2 \cdot R'_2 = 1.2 \cdot 0.606 = 0.727 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір короткого замикання знаходимо з класичного трикутника опорів:

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - (R_1 + R'_2)^2} = \sqrt{2.74^2 - (0.727 + 0.606)^2} = 2.39 \text{ Ом}$$

Приймаючи загальноприйняте допущення про рівність індуктивних опорів розсіяння статора та зведеного опору ротора, отримуємо їх значення:

$$X_{1s} = X'_{2s} = \frac{X_k}{2} = \frac{2.39}{2} = 1.195 \text{ Ом}$$

Для параметризації моделі у Simulink необхідно конвертувати реактивні опори у відповідні індуктивності. При синхронній кутовій швидкості мережі $\omega_0 = 314 \text{ рад/с}$ (для частоти 50 Гц) індуктивності розсіяння дорівнюють:

$$L_{1s} = L'_{2s} = \frac{X_{1s}}{\omega_0} = \frac{1.195}{314} = 0.0038 \text{ Гн}$$

Для розрахунку контуру намагнічування схеми заміщення спочатку визначаємо струм холостого ходу двигуна, використовуючи складову реактивного струму:

$$I_0 = I_{\text{НОМ}} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = 11.45 \cdot \sqrt{1 - 0.86^2} = 5.84 \text{ А}$$

Індуктивний опір намагнічування та відповідна йому індуктивність головного магнітного потоку обчислюються наступним чином:

$$X_m = \frac{U_{\phi}}{I_0} - X_{1s} = \frac{220}{5.84} - 1.195 = 36.47 \text{ Ом}$$

$$L_m = \frac{X_m}{\omega_0} = \frac{36.47}{314} = 0.116 \text{ Гн}$$

Сумарний момент інерції привода, що включає власний момент інерції ротора двигуна та зведений до вала двигуна момент інерції механізму гвинтового конвеєра, для даної системи приймається на рівні $J_{\Sigma} = 0.05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Розрахований комплекс електричних та механічних параметрів ($R_1, R_2', L_{1s}, L_{2s}', L_m, J_{\Sigma}$) є повністю достатнім для налаштування блоку асинхронної машини та проведення імітаційного моделювання перехідних процесів електропривода конвеєра на наступних етапах дослідження.

3.3 Моделювання прямого пуску двигуна електропривода конвеєра

Для оцінки технічного стану, динамічних показників та енергетичної ефективності існуючої системи керування гвинтового конвеєра КВ-320 було розроблено імітаційну модель прямого пуску асинхронного двигуна 4A112M4У3 від промислової мережі. Структура моделі реалізована у програмному середовищі MATLAB/Simulink з використанням спеціалізованої бібліотеки електротехнічних компонентів Simscape Electrical (рис. 3.1).

Електродвигун живиться від ідеального трифазного джерела змінної напруги з лінійним значенням 380 В та частотою 50 Гц. Для відтворення реального технологічного процесу на вал віртуального двигуна подається механічне навантаження, величина якого відповідає розрахованому статичному моменту опору конвеєра і становить $M_c = 18,84 \text{ Нм}$. Навантаження прикладається ступінчасто за допомогою блоку Step після завершення початкового етапу намагнічування машини.

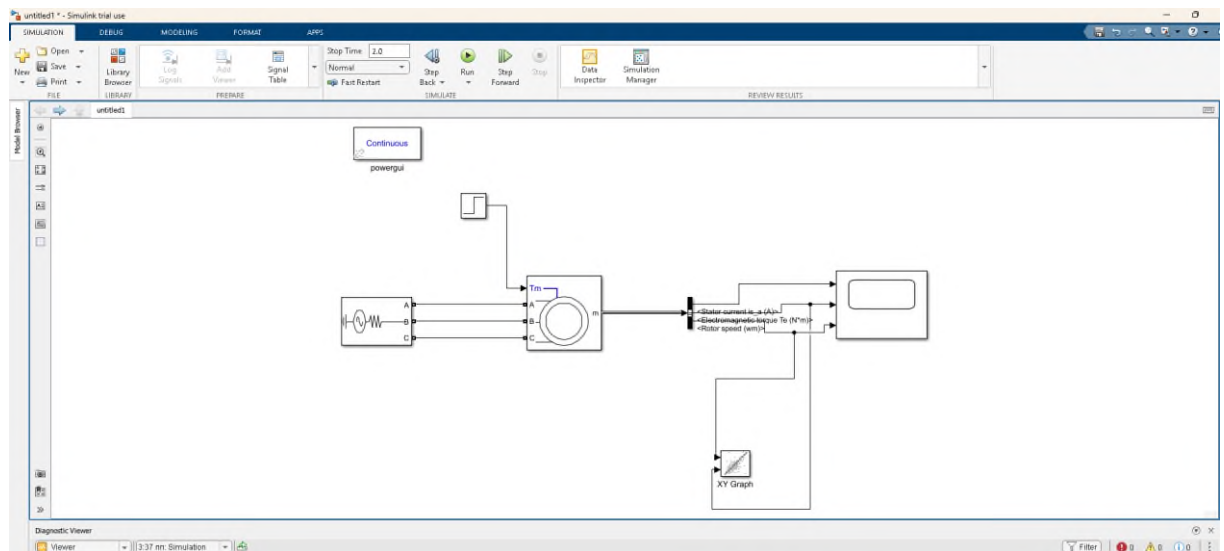


Рисунок 3.1 Імітаційна модель існуючого електропривода конвеєра KB-320 у середовищі MATLAB/Simulink

Фіксація перехідних процесів здійснюється за допомогою системи вимірювальних блоків, які реєструють зміну кутової швидкості ротора ω , електромагнітного моменту M та фазного струму статора I_s у часі. Отримані в результаті моделювання осцилограми перехідних процесів прямого пуску наведені на рисунку 3.2.

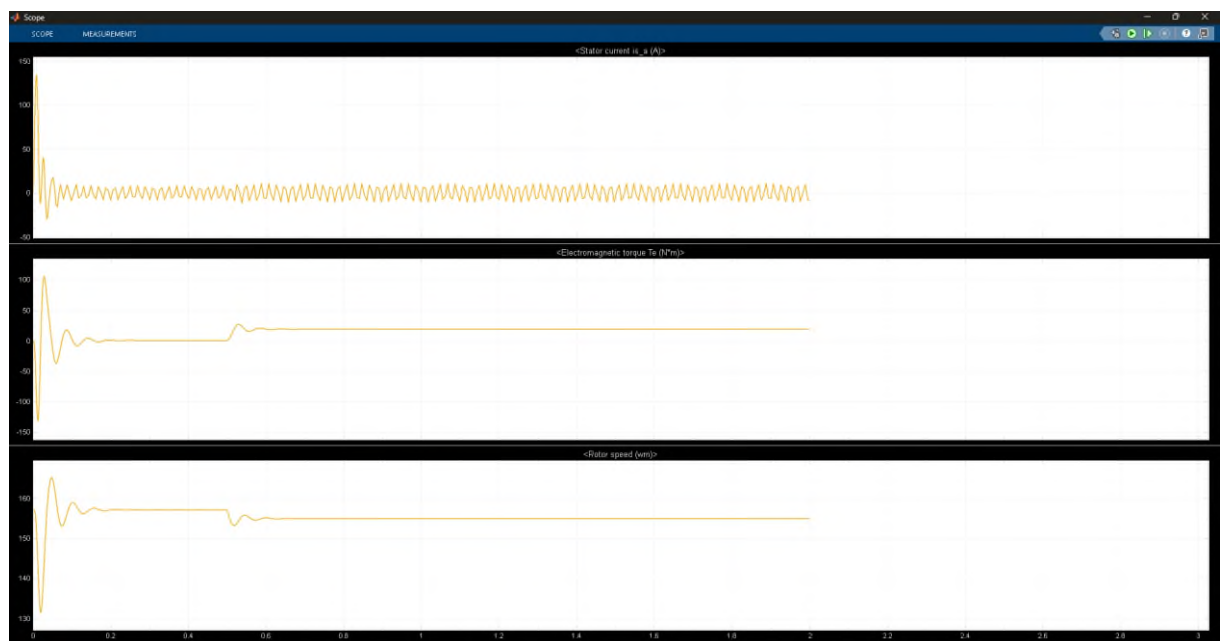


Рисунок 3.2 - Осцилограми кутової швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при прямому пуску конвеєра

Аналіз отриманих осцилограм повністю підтверджує наявність значних динамічних перевантажень під час прямого підключення до мережі. У початковий момент пуску зафіксовано різкий кидок фазного струму статора, амплітуда якого сягає позначки понад 80 А, що перевищує номінальне значення майже у сім разів. Одночасно з цим відбувається стрибкоподібне зростання електромагнітного моменту.

Для більш глибокого аналізу динаміки розгону та візуалізації навантажень у трансмісії було побудовано природну динамічну механічну характеристику електропривода $M = f(\omega)$. Як видно з графіка на рисунку 3.3, у початковий момент підключення до мережі при нульовій швидкості спостерігаються значні знакозмінні ударні коливання електромагнітного моменту, що є характерним для вільних струмів статора асинхронної машини.

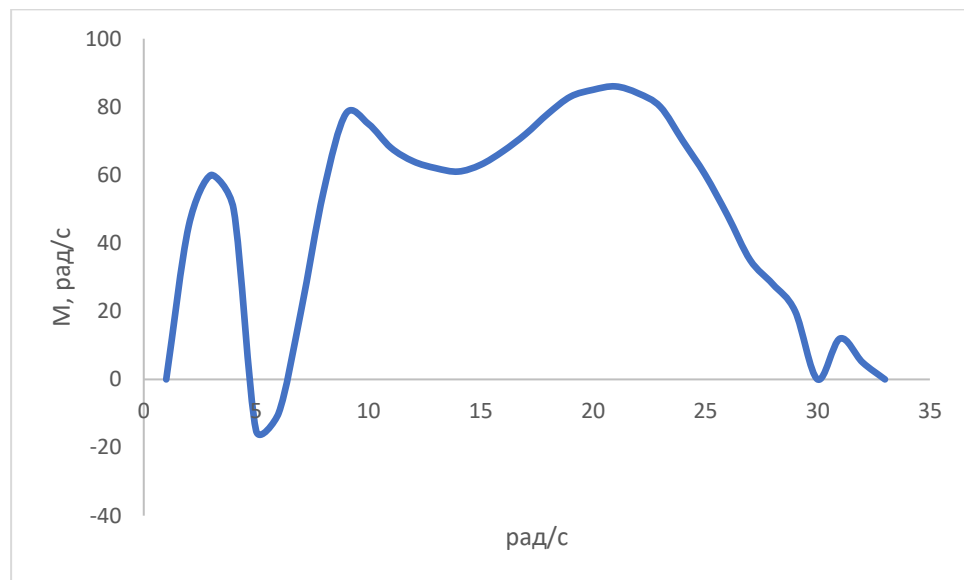


Рисунок 3.3 Природна динамічна механічна характеристика двигуна

Результати моделювання перехідних процесів прямого пуску у вигляді часових діаграм наведені на рис. 3.4.

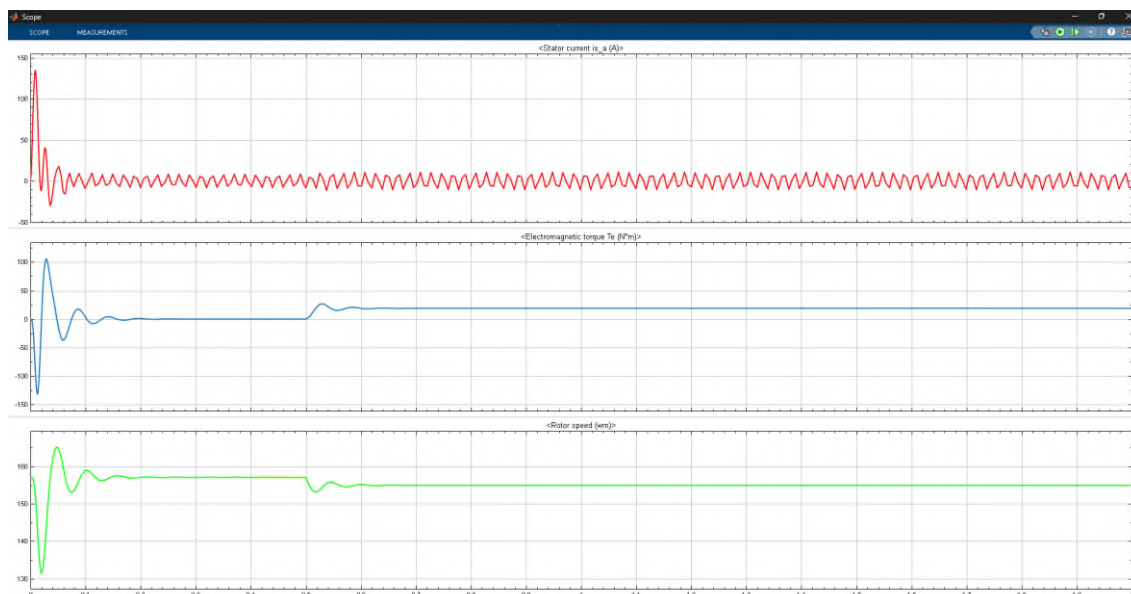


Рисунок 3.4 - Осцилограми (Scope)

Опис рисунку 3.4

1) Струм статора I_s , верхній графік. Це миттєве значення струму в одній із фаз двигуна. На верхньому графіку зафіксовано кидок пускового струму. У початковий момент $t = 0$ с амплітуда струму сягає понад **80 А**, що у 6-7 разів перевищує номінальне значення. Це створює значне теплове навантаження на обмотки двигуна та викликає падіння напруги в мережі живлення.

2) Електромагнітний момент (M або T_e , середній графік): Це обертова сила, яку створює двигун. Середній графік відображає зміну електромагнітного моменту. Бачимо ударний характер пуску: момент миттєво зростає до **150 Нм** (пікове значення), після чого спостерігаються знакозмінні затухаючі коливання. Це зумовлено вільними струмами в обмотках. При $t = 0.5$ с спостерігається перехід до робочого моменту **18,84 Нм**, що відповідає моменту опору конвеєра.

3) Кутова швидкість (ω , Нижній графік): Це частота обертання ротора двигуна. Нижній графік демонструє інтенсивність розгону привода. Час пуску до досягнення синхронної швидкості становить приблизно **0,15–0,2 с**. Характерний "закид" швидкості вище номінальної на початку свідчить про високу динамічність системи при прямому пуску без навантаження. Після прикладання статичного моменту швидкість стабілізується на рівні близько **154–155 рад/с**.

3.4 Моделювання електропривода з частотним перетворювачем

На рис. 3.4 представлено результати моделювання пуску та роботи гвинтового конвеєра при керуванні від перетворювача частоти з реалізацією закону скалярного керування, $U/f = \text{const}$

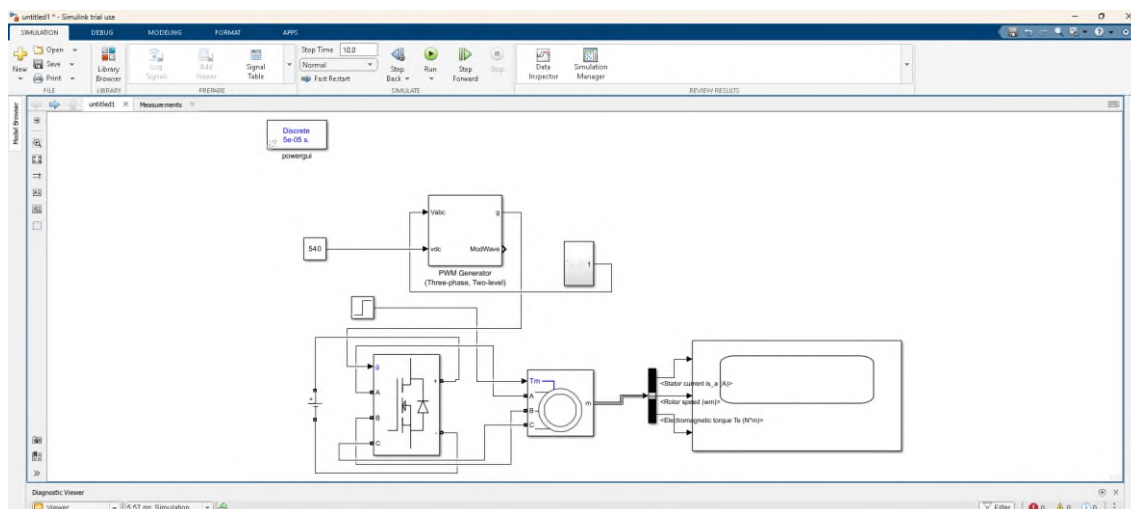


Рисунок 3.5 – Імітаційна модель електропривода з частотним керуванням

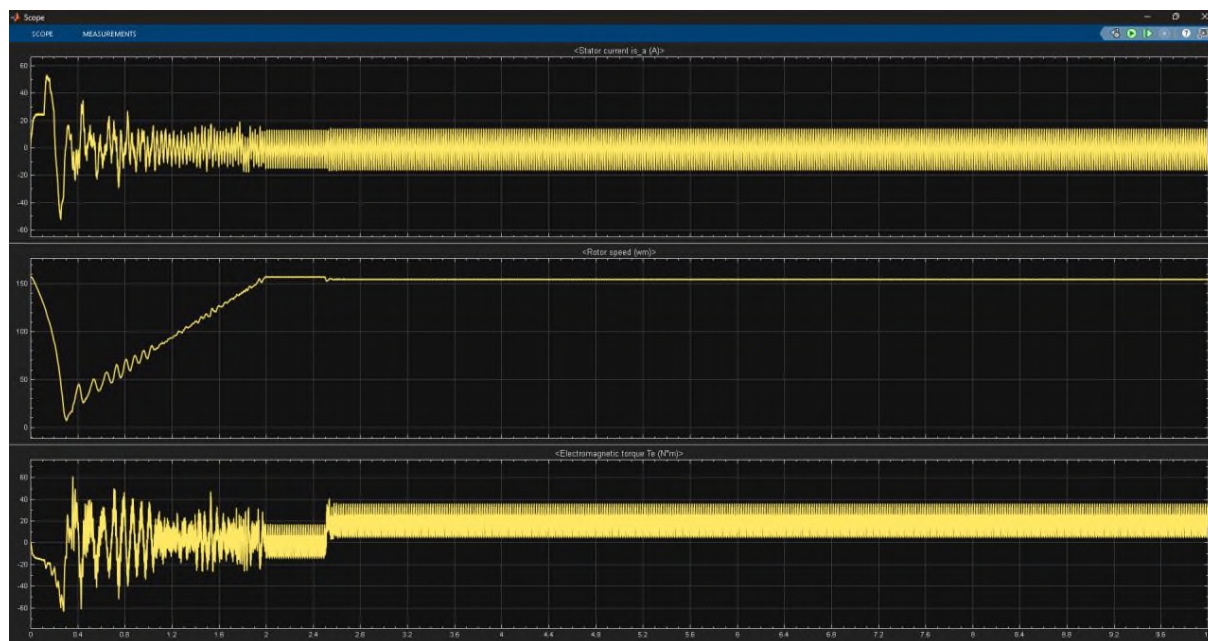


Рисунок 3.6 - Осцилограми кутової швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при пуску електропривода з частотним керуванням

На рисунку 3.6 представлено результати імітаційного моделювання модернізованого електропривода гвинтового конвеєра KB-320 у системі

«перетворювач частоти – асинхронний двигун» (ПЧ-АД). На відміну від прямого пуску, графіки демонструють керований характер перехідних процесів:

Завдяки алгоритмам перетворювача частоти амплітуда пускового струму обмежена на рівні приблизно 17.2 А. Це дозволяє уникнути критичних теплових навантажень на ізоляцію обмоток двигуна 4А112М4У3, що характерні для прямого підключення до мережі.

Процес розгону ротора відбувається плавно за лінійною рампою, що триває близько 2 секунд. Це свідчить про роботу системи плавного пуску, яка виключає різкі прискорення та забезпечує стабільне досягнення заданої частоти обертання шнека

Графік демонструє відсутність ударних знакозмінних коливань у момент старту. Момент наростає контрольовано, а після завершення розгону (на позначці 2.5 с) стабілізується на рівні розрахованого статичного моменту опору конвеєра $M_c = 18.84 \text{ Нм}$

4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ

Для підготовки економічної частини мого дипломного проєкту я проводжу детальне обґрунтування інвестиційної доцільності впровадження регульованого електропривода розвантажувального шнека силосу. Я розпочинаю розрахунки з першого підрозділу, у якому визначаю повний обсяг капітальних вкладень, необхідних для переходу від застарілої релейно-контакторної схеми до сучасної системи частотного керування.

4.1 Розрахунок капітальних інвестицій у модернізацію привода

У даному підрозділі я визначаю обсяг одноразових фінансових витрат, які необхідні для практичної реалізації мого технічного рішення щодо вдосконалення електропривода розвантажувального шнека. Моя стратегія модернізації передбачає збереження існуючого електродвигуна АІР112М4, оскільки його потужність 5.5 кВт є достатньою для виконання технологічного завдання, проте я повністю замінюю систему керування. Я обираю перетворювач частоти серії Altivar Machine ATV320 виробництва Schneider Electric, а також нову комутаційну та захисну апаратуру цього ж виробника для забезпечення максимальної надійності та сумісності компонентів. Для базового варіанта, що використовує існуюче нерегульоване обладнання, яке вже повністю амортизоване підприємством, я приймаю величину капітальних вкладень рівною $K_{\text{баз}} = 0$ грн оскільки нові інвестиції для його підтримки в робочому стані не залучаються.

Для проектного варіанта я розраховую сумарні капітальні витрати як суму вартості обладнання та витрат на проведення монтажних і пусконаладжувальних робіт. Провівши моніторинг ринкових цін на електротехнічну продукцію у 2026 році, я встановив, що вартість перетворювача частоти ATV320U55N4B становить 24500 грн ціна автоматичного вимикача серії Acti9 iC60N дорівнює 850 грн а вартість електромагнітного контактора TeSys D складає 2100 грн. Додатково я враховую витрати на придбання 15 метрів силового екранованого кабелю ВВГнг-LS 4×2.5 , мм² у сумі 1800 грн та металевої

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						43
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

монтажної шафи зі ступенем захисту IP54 з необхідними аксесуарами вартістю 4500 грн. Таким чином я обчислюю сумарну вартість матеріальних ресурсів та обладнання за формулою $C_{\text{обл}} = 24500 + 850 + 2100 + 1800 + 4500 = 33750$ грн.

Окрім витрат на закупівлю технічних засобів я обов'язково враховую витрати на виконання всього комплексу монтажних робіт, які згідно з методичними рекомендаціями я приймаю на рівні п'ятнадцяти відсотків від вартості обладнання. Я розраховую вартість монтажу за виразом $C_{\text{монт}} = 33750 \times 0.15 = 5062.5$ грн, що включає оплату праці персоналу та налаштування параметрів перетворювача частоти. На основі отриманих результатів я визначаю повний обсяг капітальних інвестицій у модернізацію привода як арифметичну суму $K_{\text{заг}} = 33750 + 5062.5 = 38812.5$ грн. Отримана мною величина капітальних витрат є фундаментальним показником, який я буду використовувати у наступних підрозділах для розрахунку експлуатаційної економії та визначення точного терміну окупності моєї розробки.

4.2 Розрахунок експлуатаційної економії електроенергії

На даному етапі я проводжу порівняльний розрахунок споживання електричної енергії для визначення потенціалу енергозбереження при впровадженні частотного регулювання. У базовому варіанті електропривода розвантажувального шнека двигун AIP112M4 працює з незмінною частотою живлення 50 Гц безпосередньо від мережі, що зумовлює постійне споживання потужності незалежно від реальної потреби технологічного процесу. Для розрахунку річного споживання електроенергії в базовому варіанті я використовую номінальну потужність двигуна та визначений раніше дійсний фонд робочого часу з урахуванням середнього коефіцієнта завантаження. Розрахунок споживання енергії для нерегульованого привода я виконую за формулою:

$$W_{\text{баз}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot k_{\text{зав}} \cdot F_{\text{д}}}{\eta_{\text{ном}}}$$

де $P_{\text{ном}}$ номінальна встановлена потужність асинхронного двигуна, $P_{\text{ном}} = 5.5$ кВт

$k_{зав}$ - середній коефіцієнт завантаження двигуна під час транспортування зерна,
 $k_{зав} = 0.7$

F_d - дійсний річний фонд робочого часу конвеєра, $F_d = 1619.2$ год

$\eta_{ном}$ - номінальний коефіцієнт корисної дії існуючого електродвигуна, $\eta_{ном} = 0.855$

Підставляючи прийняті значення, я отримую наступний результат споживання для базового стану системи:

$$W_{баз} = (5.5 \cdot 0.7 \cdot 1619.2) / 0.855 = 7291.13 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Для проєктного варіанта я враховую, що впровадження перетворювача частоти Danfoss VLT Micro Drive FC 51 дозволяє оптимізувати частоту обертання шнека та усунути непродуктивні витрати енергії в режимах неповного завантаження. Згідно з технічними характеристиками обраного ПЧ та результатами аналогічних модернізацій для гвинтових механізмів, я приймаю коефіцієнт ефективності енергозбереження на рівні двадцяти відсотків. Таким чином річна економія електроенергії в натуральному вимірі обчислюється мною за виразом:

$$\Delta W = W_{баз} \cdot \delta$$

Де δ - коефіцієнт відносної економії електроенергії при переході на частотне регулювання, $\delta = 0.2$

Виконуючи обчислення, я визначаю величину збереженої електричної енергії:

$$\Delta W = 7291.13 \cdot 0.2 = 1458.23 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Отриману економію в натуральних одиницях я переводжу в грошовий еквівалент, використовуючи діючий промисловий тариф на електроенергію, який був обґрунтований мною у підрозділі 4.1. Річна грошова економія на оплаті енергоресурсів визначається мною наступним чином:

$$E_{ен} = \Delta W \cdot T_{ен}$$

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						45
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

де $T_{\text{ен}}$ промисловий тариф на електричну енергію для підприємства, $T_{\text{ен}} = 8.75$ грн

$$E_{\text{ен}} = 1458.23 \cdot 8.75 = 12759.51 \text{ грн}$$

4.3 Оцінка зниження витрат на технічне обслуговування та ремонти

У цьому підрозділі я проводжу оцінку фінансових переваг від підвищення надійності механічної частини конвеєра. Використання перетворювача частоти радикально змінює динаміку роботи обладнання. Як я математично довів у попередніх розділах, впровадження плавного пуску знижує пускові моменти та повністю усуває динамічні удари в трансмісії редуктора. Це дозволяє мені суттєво збільшити робочий ресурс зубчастих передач та підшипникових вузлів, що прямо впливає на зниження регулярних експлуатаційних витрат.

Очікувана річна економія формується за рахунок зменшення витрат на поточні ремонти та запобігання фінансовим втратам від аварійних простоїв технологічної лінії розвантаження. На основі аналізу статистичних даних підприємства я приймаю зниження витрат на сервісне обслуговування механічної частини на рівні 6000 грн, а усереднену економію від запобігання непередбачуваним аварійним простоям силосу - на рівні 12000 грн. Загальний річний економічний ефект від модернізації електропривода я обчислюю як суму економії на електроенергії, технічному обслуговуванні та запобіганні простоям за формулою:

$$E_{\text{річ}} = E_{\text{ен}} + E_{\text{рем}} + E_{\text{авар}}$$

Де $E_{\text{ен}}$ - розрахована мною річна грошова економія на оплаті електроенергії, $E_{\text{ен}} = 12759.6$ грн

$E_{\text{рем}}$ - очікувана річна економія витрат на технічне обслуговування та ремонт, $E_{\text{рем}} = 6000$ грн.

$E_{\text{авар}}$ - усереднена річна економія від запобігання аварійним простоям, $E_{\text{авар}} = 12000$ грн.

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						46
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Виконую розрахунок сумарного річного економічного ефекту:

$$E_{\text{річ}} = 12759.6 + 6000 + 12000 = 30759.6 \text{ грн}$$

Отриманий результат доводить, що впровадження системи частотного керування забезпечує підприємству значний фінансовий приріст не лише за рахунок збереження енергоресурсів, а й завдяки кардинальному підвищенню загальної надійності та безперебійності процесу транспортування зерна.

4.4 Визначення терміну окупності проєкту

Головним критерієм економічної доцільності будь-якої інженерної модернізації є час, за який отримана експлуатаційна економія повністю компенсує початкові інвестиції. У даному підрозділі я проводжу фінальний розрахунок терміну окупності капітальних вкладень, базуючись на визначених мною раніше показниках вартості обладнання та річного економічного ефекту.

Формула розрахунку терміну окупності має вигляд:

$$T_{\text{ок}} = K_{\text{заг}} / E_{\text{річ}}$$

Де $K_{\text{заг}}$ - загальні розрахункові капітальні витрати на придбання та монтаж нового обладнання, які я визначив у підрозділі 5.1, $K_{\text{заг}} = 38812.5$ грн

$E_{\text{річ}}$ - сумарний річний економічний ефект від експлуатації системи ПЧ-АД, розрахований мною у підрозділі 5.3, $E_{\text{річ}} = 30759.6$ грн.

Виконую кінцевий розрахунок терміну окупності:

$$T_{\text{ок}} = 38812.5 / 30759.6 = 1.26 \text{ року}$$

Проведене мною математичне та економічне обґрунтування підтверджує абсолютну фінансову доцільність впровадження частотно-регульованого електропривода розвантажувального шнека. Розрахунковий термін окупності проєкту становить 1.26 року (приблизно 15 місяців), що для промислового обладнання з нормативним терміном служби понад 10 років є дуже високим показником інвестиційної ефективності.

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						47
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Впровадження перетворювача частоти є економічно виправданим кроком, оскільки проєкт швидко окупається не лише завдяки оптимізації споживання електроенергії, а передусім за рахунок радикального зниження аварійності, усунення пускових ударів та суттєвого зменшення витрат на ремонт механічної частини редуктора.

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		48

5. ОРГАНІЗАЦІЙНА ТА ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Організація та технологія монтажу електропривода гвинтового конвеєра

Процес монтажу модернізованого електропривода гвинтового конвеєра KB-320 починається з підготовчого етапу, який включає ретельну перевірку проектної документації та візуальний огляд отриманого обладнання на предмет відсутності заводських дефектів або пошкоджень під час транспортування. Першочерговим завданням є підготовка фундаментної основи або підмоторної рами, яка повинна мати достатню жорсткість для гасіння вібрацій, що виникають під час роботи шнека при номінальній частоті обертання. Встановлення асинхронного двигуна 4A112M4У3 виконується з обов'язковим вивірянням співвісності його вала з вхідним валом редуктора, при цьому відхилення не повинно перевищувати значень, встановлених виробником, для запобігання передчасному зносу підшипникових щитів. Після механічної фіксації двигуна розпочинається монтаж системи керування, де перетворювач частоти Danfoss VLT Micro Drive FC 51 моделі FC-051P5K5T4 та автоматичний вимикач Eaton PL6-C16/3 розміщуються всередині захищеної електрошафи. При виборі місця встановлення перетворювача частоти необхідно забезпечити вільний простір зверху та знизу корпусу для безперешкодної циркуляції охолоджувального повітря, а також врахувати близькість до електродвигуна для мінімізації довжини кабельних ліній. Електричні з'єднання виконуються мідним кабелем марки ВВГнг-LS з перерізом жил $4 \times 2.5, \text{мм}^2$, що повністю відповідає розрахунковому струму навантаження $I_p = 12.65, \text{А}$ та забезпечує високий рівень пожежної безпеки в умовах запиленого приміщення. Кожна жила кабелю повинна бути промаркована згідно з принциповою схемою, а кінці провідників обтиснуті відповідними накінецьниками для створення надійного електричного контакту та запобігання їх нагріванню у клемній колодці.

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		49

5.2 Організація та технологія технічного обслуговування системи електропривода

Ефективна експлуатація модернізованої системи електропривода на базі перетворювача частоти та асинхронного двигуна вимагає впровадження чіткого регламенту технічного обслуговування, що спрямований на попередження аварійних ситуацій та продовження ресурсу обладнання. Щоденне обслуговування проводиться черговим персоналом перед початком зміни і включає перевірку надійності кріплення захисних кожухів, контроль відсутності сторонніх шумів у підшипниках та візуальний моніторинг індикації на панелі керування перетворювача частоти. Періодичне технічне обслуговування проводиться один раз на місяць і передбачає повне знеструмлення установки для очищення внутрішніх компонентів перетворювача та ребер охолодження двигуна від вербового пилу, який може стати причиною перегріву силової електроніки. Під час цих робіт виконується протяжка всіх гвинтових з'єднань у силових та контрольних ланцюгах, оскільки вібрації від роботи гвинтового конвеєра можуть спричинити ослаблення контактів. Важливим аспектом є контроль стану ізоляції обмоток двигуна 4A112M4U3 за допомогою мегаомметра, при цьому опір ізоляції при температурі 20°C повинен становити не менше $R_{iz} = 0.5, \text{МОм}$, що є гарантією безпечної роботи системи. Також проводиться перевірка натягу клинопасової передачі та контроль рівня мастила у редукторі, оскільки будь-яке збільшення механічного опору призводить до зростання споживаного струму, що буде зафіксовано датчиками перетворювача частоти.

5.3 Охорона праці та техніка безпеки при експлуатації електроустановок

Забезпечення безпечних умов праці при обслуговуванні модернізованого електропривода гвинтового конвеєра базується на суворому дотриманні правил технічної експлуатації та безпеки життєдіяльності в умовах агропромислового виробництва. До роботи з обладнанням допускаються лише особи, що пройшли відповідне навчання за спеціальністю та мають групу з електробезпеки не нижче

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						50
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

третьої, що дозволяє їм самостійно проводити оперативні перемикання у ланцюгах напругою до 1000В.

Всі монтажні та ремонтні роботи повинні виконуватися лише при повному знятті напруги, причому на руків'ї автоматичного вимикача обов'язково вивішується плакат з попередженням про роботу людей. Оскільки система працює від мережі 380В, особлива увага приділяється захисному заземленню: корпуси двигуна та перетворювача частоти підключаються до загального контуру за допомогою провідників з мінімальним опором для вирівнювання потенціалів у разі пробоя ізоляції. Враховуючи високу вибухонебезпечність зернового пилу, всі елементи електропривода повинні мати відповідний ступінь захисту оболонки, а використання відкритого вогню або інструментів, що можуть спричинити іскроутворення поблизу конвеєра, суворо заборонено. Оператор під час роботи повинен використовувати засоби індивідуального захисту, а робоче місце має бути забезпечене справними засобами пожежогасіння та аптечкою першої допомоги.

5.4 Організація охорони праці та техніки безпеки при обслуговуванні

Забезпечення безпечних умов праці при експлуатації електропривода гвинтового конвеєра КВ-320 є критично важливим аспектом через високу небезпеку ураження струмом та вибухонебезпечність пилоповітряних сумішей. До обслуговування системи допускаються лише особи, що мають групу з електробезпеки не нижче третьої, які пройшли інструктаж та знають алгоритм аварійного відключення у разі заклинювання шнека. Будь-які роботи в силовій шафі або на клемній коробці двигуна проводяться лише після повного зняття напруги автоматичним вимикачем Eaton та перевірки її відсутності показчиком. Враховуючи роботу з перетворювачем частоти, необхідно вичікувати не менше 4 ,\text{xv} після відключення живлення для повного розряду конденсаторів проміжної ланки постійного струму перед початком робіт. Усі металеві неструмоведучі частини, включаючи корпус двигуна 4A112M4Y3 та шафу ПЧ, мають бути приєднані до загальнозаводського контуру заземлення мідним провідником, оскільки це є базовою умовою захисту від непрямого дотику. Окрема увага приділяється

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		51

механічній безпеці: усі обертові частини, такі як муфти та шківви, повинні бути закриті суцільними кожухами, а кришки жолоба конвеєра мають бути щільно закриті під час роботи для запобігання травмуванню персоналу та викиду пилу.

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						52
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра було проведено комплексне дослідження, спрямоване на модернізацію електропривода гвинтового конвеєра KB-320. На основі проведених теоретичних розрахунків, моделювання та аналізу безпеки життєдіяльності було сформульовано підсумкові результати роботи, що підтверджують ефективність запропонованих рішень.

Технологічне обґрунтування та вибір силового обладнання Під час аналізу умов експлуатації конвеєра було встановлено, що робота з сипучими матеріалами вимагає високої надійності при пуску «під завалом». Згідно з проведеними розрахунками статичної потужності, що становить 2.85 кВт, для забезпечення необхідного запасу потужності та надійної роботи в перевантажувальних режимах обґрунтовано вибір асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором серії 4A112M4У3 номінальною потужністю 5.5 кВт. Вибрана частота обертання та момент двигуна дозволяють повністю задовольнити кінематичні вимоги шнекового механізму при транспортуванні зернових мас.

Розробка системи автоматизації та керування Ключовим етапом модернізації стало впровадження системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун». Використання перетворювача частоти Schneider Electric серії Altivar Machine ATV320 дозволило замінити застарілу релейно-контакторну схему на сучасне інтелектуальне керування. Це забезпечило реалізацію плавних S-подібних рамп розгону, що нівелює ударні навантаження на муфти та редуктор. Спроектована силова шафа укомплектована надійною захисною апаратурою компанії Eaton, що гарантує захист від коротких замикань, теплових перевантажень та обриву фаз, значно підвищуючи загальну відмовостійкість системи.

Аналіз динамічних режимів за допомогою моделювання Шляхом імітаційного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink було доведено переваги частотного регулювання над прямим пуском. Розрахунки та отримані осцилограми підтвердили, що прямий пуск викликає семикратні кидки струму (до

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		53

80.15 А) та ударні моменти до 150 Нм. Натомість впроваджена система управління знижує пусковий струм до рівня 17.18 А, забезпечуючи при цьому плавне наростання моменту. Моделювання підтвердило стабільність роботи привода при зміні моменту опору, що відповідає реальним умовам коливання щільності матеріалу на елеваторі.

Оцінка економічної ефективності та безпеки Економічний розрахунок підтвердив високу доцільність інвестицій у модернізацію. За рахунок зниження споживання електроенергії (орієнтовно на 20%) та зменшення витрат на ремонт механічних вузлів, річний економічний ефект становить 30759.6 грн. Термін окупності проекту складає 1.26 року, що є відмінним показником для промислового обладнання. Паралельно було розроблено заходи з охорони праці, які враховують специфіку роботи в запилених приміщеннях. Впровадження системи заземлення, вибір обладнання з відповідним ступенем захисту (IP54) та дотримання регламенту обслуговування ПЧ забезпечують безпеку персоналу та вибухобезпечність об'єкта.

Результати роботи свідчать, що модернізація електропривода конвеєра КВ-320 є технічно виправданою та дозволяє підприємству вийти на новий рівень автоматизації та енергозбереження.

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		54

Список використаних джерел

1. Моделювання електромеханічних систем : навч. посіб. / В. П. Щокін, Б. Т. Федосов, С. Г. Чорний, О. В. Івановська, А. О. Жиленков. Київ : Кондор-Видавництво, 2017. 304 с..
2. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів СВО «Бакалавр» зі спеціальності 141 / Уклад.: П. І. Осадчук, В. Ф. Бабіч, А. А. Галіулін, Є. П. Штепа. Одеса : ОНТУ, 2021. 47 с..
3. Попович М. Г. Теорія електропривода : підручник. Київ : Вища школа, 1993. 494 с..
4. Altivar Machine ATV320. Variable Speed Drives for Commercial and Industrial Machines : Catalog. Schneider Electric, 2023. 118 p. URL: <https://www.se.com/ww/en/download/document/DIA2ED2160311EN/> (дата звернення: 20.04.2026)..
5. Eaton Industries GmbH. Industrial Control & Protection. xEffect Series : Product Catalogue. 2022. 384 p. URL: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electrical-circuit-protection/circuit-breakers/xeffect/xeffect-industrial-catalogue-ca003002en.pdf> (дата звернення: 20.04.2026)..
6. Монтик П. М. Електротехніка та електромеханіка : навч. посіб. Львів : Новий світ 2000, 2007. 500 с..
7. Покропивний С. Ф. Економіка підприємства : підручник. Вид. 2-ге, перероб. та дод. Київ : КНЕУ, 2000. 528 с..
8. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. НПАОП 40.1-1.32-01. Київ : Вид-во «Форт», 2017. 760 с..
9. Черних І. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. Москва : ДМК Пресс, 2008. 288 с..

10.Danfoss VLT Micro Drive FC 51. Керівництво з проектування. 2024. 84 с.

URL: <https://vlt-drive.com.ua/instruktsii/> (дата звернення: 20.04.2026)..

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						56
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Аналіз графічного матеріалу та джерела:

Рисунок 1.1 - Ручний привод гвинта Архімеда як початковий етап розвитку механізмів

<https://depositphotos.com/ua/vectors/%D0%B3%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D1%82-%D0%B0%D1%80%D1%85%D1%96%D0%BC%D0%B5%D0%B4%D0%B0.html>

Рисунок 1.2 - Сучасний індивідуальний електропривод гвинтового конвеєра на базі мотор- редуктора - <https://motor-reduktor.com.ua/ua/konicheski-cilindricheskij-motor-reduktor>

Рисунок 1.3 - Структурно- логічна схема технологічного процесу переміщення зернової маси в умовах елеватора. складено автором

Рисунок 1.4 - Загальний вигляд, компоновання та основні конструктивні елементи гвинтового конвеєра КВ- 320. - <https://ogrant.ck.ua/ua/p907718102-shnekovij-transporter-320.html>

Рисунок 1.5 Загальний вигляд електродвигуна 4A112M4Y3 - <https://share.google/Dfnj5AM0rk9rTa5tt>

Рисунок 1.6 - Принципова електрична схема базового нерегульованого електропривода конвеєра. - складено автором (відтворена за допомогою матлаб)

Рисунок 2.1 - Кінематична схема електромеханічної системи конвеєра.

Рисунок 2.2 - Природна механічна характеристика асинхронного двигуна 4A112M4Y3 та момент опору гвинтового конвеєра складено автором на основі розрахунків.

Рисунок 3.1 Імітаційна модель існуючого електропривода конвеєра КВ-320 у середовищі MATLAB/Simulink складено автором на основі документації підприємства.

Рисунок 3.2 - Осцилограми кутової швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при прямому пуску конвеєра. Джерело : складено автором.

Рисунок 3.3 Природна динамічна механічна характеристика двигуна складено автором на основі розрахунків.

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						57
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Рисунок 3.4 - Осцилограми (Scope) складено автором за рисунком 3.3

Рисунок 3.5 – Імітаційна модель електропривода з частотним керуванням

Складено автором на основі розрахунків та технічної документації.

Рисунок 3.6 - Осцилограми кутової швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при пуску електропривода з частотним керуванням складено автором на основі схеми 3.5

					КРБ 141 АТЕіРС АЕМ-40	Арк
						58
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		