

Міністерство освіти і науки України
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра Е та М



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

**на тему «Модернізація електропривода вертикального ковшового підйомника
сипучого матеріала»**

(назва кваліфікаційної роботи згідно наказу ОНТУ)

Здобувача (ки) Глебов О.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 16.06 2026 р., протокол №8.

Завідувач(ка) кафедри АТЕРС. Олексій Жигайло
(назва кафедри) (підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Одеса – 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут: *Комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування ім. П.М.Платонова*

Кафедра: *Електромеханіки та мехатроніки*

Рівень ВО: перший

Ступень ВО: бакалавр

Галузь знань: 14 – *Електрична інженерія*

Спеціальність: 141 – *Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

Освітня програма: *Екоенергетика та інтелектуальна електромеханіка*

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Зав. кафедри ЕтаМ
_____Осадчук П.І.
«_____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА здобувач СВО «Бакалавр» АЕМ - 40 Глєбов Олександр Володимирович

1. Тема роботи: «Модернізація електропривода вертикального ковшового підйомника сипучого матеріалу»

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

Затверджено наказом ОНТУ № 641-03 від 21.11.2026 р.

2. Строк подання студентом роботи: 15.06.2026 р.

3. Вхідні дані до проекту: Технічні характеристики електроприводу насінерушної машини для підготовки сировини при отриманні рослинної олії: частота обертання ротора, хв^{-1} 2500, маса 722 кг., потужність електроприводу мішалки 54 кВт.; обґрунтувати інформативні параметри управління електроприводу насінерушної машини.

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

Вступ.

1 Загальні характеристики норії: Вибір об'єкта управління для модернізації системи електроприводу, опис і аналіз реалізованого ним технологічного процесу і відповідного обладнання. Актуальність теми. Об'єкт і мета модернізації.

2 Розрахунок кінематичної схеми норії та вибір двигуна: Вимоги до автоматизованого електроприводу насінерушної машини для підготовки сировини при отриманні рослинної олії. Розрахунок потужності і вибір двигуна, перевірка за перевантаженням. Розрахунок і побудування механічної характеристики двигуна. Схема управління електроприводу.

3 Моделювання роботи електроприводу норії в середовищі MATLAB/SIMULINK: Розрахунок параметрів схеми заміщення АД електроприводу для MATLAB та розробка імітаційної моделі електроприводу насінерушної машини для підготовки сировини при отриманні рослинної олії, дослідження її роботи у середовищі Simulink.

4 Організаційно-технологічний розділ: Організація технології монтажу, ремонту і обслуговування та техніки безпеки праці при обслуговуванні електроприводу.

5 Економічне обґрунтування та ефективність проєкту: Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу центрифуги для очистки соняшникової олії.

6 Висновки і пропозиції: Висновки і рекомендації за прийнятими в проєкті рішеннями.

Список використаних джерел, на які є посилання.

Додатки.

Перелік демонстраційного матеріалу. Слайди презентації (обов'язкові):

1. Титульний слайд. 2. Актуальність теми, об'єкт дослідження, мета і завдання роботи. 3. Конструкція і технічні характеристики норії. 4. Розрахунок кінематичної схеми та потужності двигуна

електропривода норії. 5. Вибір електродвигуна та редуктора. 6. Перетворювач частоти. 7. Схема керування електроприводом з ПЧ-АД. 8. Моделювання електроприводу норії. Прямий пуск. 9-11. Результати моделювання прямого пуску. 12. Моделювання ПЧ АД. 13-15 Результати моделювання ПЧ АД 1456 об/хв. 16. Економічна ефективність модернізації. 17. Висновки.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічна частина			

6. Дата видачі завдання: 22.11.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів	Прим
1	1. Загальні характеристики норії	05.03.2026	
2	2. Розрахунок кінематичної схеми норії та вибір двигуна.	15.03.2026	
3	3. Моделювання роботи електропривода норії в середовищі MATLAB/SIMULINK.	20.03.2026	
4	4. Організаційно-технологічний розділ.	5.04.2026	
5	5. Економічне обґрунтування та ефективність проєкту.	25.04.2026	
6	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра.	22-24.06.2026	

Здобувач: Глебов О. В.

Керівник: 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 _____ Глебов О. В.

АННОТАЦІЯ

Глебов О. В. «Модернізація електропривода вертикального ковшового підйомника сипучого матеріалу». Кваліфікаційна робота бакалавра. – Одеса: ОНТУ, 2026. – 64 с. Іл.: 18. Табл.: 10. Бібліогр.: 13. Презентація: 17 слайдів.

У кваліфікаційній роботі досліджено конструкцію та принцип роботи вертикального ковшового підйомника, призначеного для транспортування сипучих матеріалів. Виконано аналіз існуючої системи електропривода та визначено основні напрямки її вдосконалення.

Проведено кінематичний розрахунок привода, визначено необхідні параметри електромеханічної системи, обрано асинхронний електродвигун, редуктор та елементи силового обладнання. Для підвищення ефективності роботи запропоновано застосування частотного перетворювача, що забезпечує плавний пуск, регулювання швидкості та зменшення навантажень на механічні вузли.

Розроблено схему керування електроприводом та виконано моделювання його роботи в середовищі MATLAB/Simulink. Проведено аналіз перехідних процесів під час прямого пуску і роботи з частотним регулюванням. Оцінено технічні та економічні переваги запропонованої модернізації.

Ключові слова: норія, ковшовий підйомник, електропривод, асинхронний двигун, перетворювач частоти, частотне керування, MATLAB/Simulink, модернізація, транспортування сипучих матеріалів.

ABSTRACT

Hliebov O. V. Modernization of the Electric Drive of a Vertical Bucket Elevator for Bulk Material Handling. Bachelor's Qualification Thesis. – Odesa: Odesa National Technological University, 2026. – 64 p. Figures: 18. Tables: 10. References: 13. Presentation: 17 slides.

The qualification thesis investigates the design and operating principles of a vertical bucket elevator used for transporting bulk materials. An analysis of the existing electric drive system was carried out, and the main directions for its modernization were identified.

A kinematic calculation of the drive system was performed, and the required parameters of the electromechanical system were determined. An induction motor, gearbox, and power equipment components were selected. To improve operational efficiency, the implementation of a frequency converter was proposed, providing smooth start-up, speed control, and reduced mechanical stress on the drive components.

A control scheme for the electric drive was developed, and its operation was simulated in the MATLAB/Simulink environment. Transient processes during direct-on-line starting and frequency-controlled operation were analyzed. The technical and economic benefits of the proposed modernization were evaluated.

Keywords: bucket elevator, electric drive, induction motor, frequency converter, variable frequency drive, speed control, MATLAB/Simulink, modernization, bulk material handling.

Зміст

ВСТУП.....	8
Розділ 1 Загальні характеристики норії.....	9
1.1 Опис технологічного процесу транспортування сипучого матеріалу норією.....	9
1.2 Конструкція та технічні характеристики вертикального ковшового підйомника (норії).....	10
1.3 Загальна характеристика існуючого електропривода норії.....	12
Розділ 2 Розрахунок кінематичної схеми норії та вибір двигуна.....	14
2.1 Вимоги до автоматизованого електропривода норії	14
2.2 Розрахунок кінематичної схеми норії	15
2.3 Вибір двигуна.....	21
2.4 Механічна характеристика двигуна	23
2.5 Розрахунок кабелю живлення двигуна норії.....	24
2.6 Вибір захисту та управління приводом норії.....	26
2.7 Вибір ПЧ для двигуна приводу норії.....	27
2.8 Схема частотного керування електропривода норії системи ПЧ-АД.....	30
Розділ 3 Моделювання роботи електропривода норії в середовищі MATLAB/SIMULINK.....	32
3.1 Постановка задачі моделювання роботи електропривода норії.....	32
3.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення двигуна електропривода норії	33
3.3 Моделювання прямого пуску електродвигуна електропривода норії	36
3.4 Моделювання пуску електродвигуна електропривода норії з ПЧ	44
3.5 Висновок по моделювання електроприводу	50
Розділ 4 Організаційно-технологічний розділ	51
4.1. Розробка технології монтажу електропривода норії.....	51
4.2. Організація системи технічного обслуговування та поточного ремонту.	53
4.3. Технологічний регламент експлуатації та налаштування перетворювача частоти.....	54

					КРБ.АТЕРС.1.641-03.1.2								
Зм.	АРК.	№ документа	Підпис	Дата	Модернізація електропривода вертикального ковшового підйомника сипучого матеріала				Літера	Аркуш	Аркушів		
Розробив	Глебов О. В.									у		6	64
Керівник	Осадчук П. І.												
Реценз.										ОНТУ Гр, АЕМ-40			
Консульт.													

4.4. Забезпечення безпечної експлуатації та заходи з охорони праці.....	55
Розділ 5 Економічне обґрунтування та ефективність проєкту	56
5.1. Розрахунок капітальних витрат на модернізацію електропривода.....	56
5.2. Аналіз експлуатаційних витрат та економії електроенергії.....	58
5.3. Розрахунок річного економічного ефекту від зменшення механічного зносу.....	59
5.4. Визначення терміну окупності системи автоматизації.....	60
Висновки і пропозиції	62
Список використаної літератури	64

ВСТУП

Актуальність теми – Норії (вертикальні ковшові підйомники) широко використовуються в промисловості для транспортування сипучих матеріалів у зернопереробній, харчовій та будівельній галузях. Надійність і продуктивність норій значною мірою залежать від роботи електропривода, який забезпечує безперервний підйом матеріалу.

На багатьох підприємствах експлуатуються норії з електроприводами застарілих конструкцій, що характеризуються високими пусковими струмами, значними втратами електроенергії та відсутністю сучасних засобів регулювання швидкості. Це призводить до підвищеного зносу механічних елементів, зростання експлуатаційних витрат та зниження ефективності роботи обладнання.

Модернізація електропривода норії із застосуванням сучасних систем керування дозволяє забезпечити плавний пуск, оптимальні режими роботи, зменшення енергоспоживання та підвищення надійності транспортування сипучих матеріалів. У зв'язку з цим тема модернізації електропривода вертикального ковшового підйомника сипучого матеріалу є актуальною.

Об'єкт дослідження – електропривод норії (вертикального ковшового підйомника сипучого матеріалу).

Мета роботи – модернізація електропривода норії з метою підвищення ефективності та надійності її роботи.

Завдання роботи:

- дослідити існуючі схеми електроприводів норій;
- визначити їх основні недоліки;
- виконати розрахунок параметрів електропривода;
- обрати електродвигун та систему керування;
- розробити схему модернізованого електропривода;
- оцінити ефективність запропонованих рішень.

Розділ 1 Загальні характеристики норії

1.1 Опис технологічного процесу транспортування сипучого матеріалу норією

Вертикальні ковшові підйомники, або норії, широко застосовуються для транспортування сипучих матеріалів у різних галузях промисловості. Найбільш поширеними є норії в зернопереробній промисловості, на елеваторах, комбикормових заводах, а також у будівельній галузі для переміщення піску, цементу та інших матеріалів. Основним призначенням норії є безперервний вертикальний підйом матеріалу на задану висоту з подальшим його вивантаженням у приймальні бункери або транспортні системи.

Технологічний процес роботи норії полягає у завантаженні сипучого матеріалу в нижній частині підйомника, де він потрапляє у ковші, закріплені на тяговому органі. Тяговим органом може бути гумотканинна стрічка або ланцюг. Під час руху стрічки або ланцюга ковші піднімаються вгору разом із матеріалом уздовж вертикальної шахти норії. У верхній частині підйомника матеріал під дією відцентрових сил або сили тяжіння вивантажується з ковшів у розвантажувальний патрубок.

Процес транспортування є безперервним, що дозволяє забезпечити стабільну продуктивність обладнання. Швидкість руху тягового органа вибирається залежно від типу матеріалу, висоти підйому та вимог до продуктивності. Надмірне збільшення швидкості може призводити до втрат матеріалу та підвищеного зносу механічних елементів, тоді як зменшення швидкості знижує продуктивність норії.

Під час експлуатації норії важливе значення має рівномірність подачі матеріалу та запобігання перевантаженням. Перевантаження можуть викликати пробуксовування стрічки, перевищення допустимого моменту на валу електродвигуна та аварійні зупинки. Тому електропривод норії повинен забезпечувати стабільну роботу в різних режимах навантаження та можливість плавного пуску.

Таким чином, технологічний процес транспортування сипучого матеріалу норією вимагає надійного та керованого електропривода, здатного працювати в умовах змінних навантажень і забезпечувати безперебійну роботу обладнання.

1.2 Конструкція та технічні характеристики вертикального ковшового підйомника (норії)

Норія складається з ряду основних конструктивних елементів, які забезпечують її ефективну роботу. До основних елементів належать нижня та верхня головки, тяговий орган із ковшами, корпус (шахта), а також приводний механізм.

Нижня головка норії призначена для завантаження сипучого матеріалу. У цій частині розташований натяжний барабан, який забезпечує необхідний натяг стрічки або ланцюга. Верхня головка містить приводний барабан, що передає обертальний рух від електродвигуна до тягового органа. Саме у верхній частині відбувається розвантаження матеріалу.

Тяговий орган норії може бути виконаний у вигляді гумотканинної стрічки або металевого ланцюга, на якому закріплюються ковші. Ковші виготовляються з металу або полімерних матеріалів і призначені для захоплення та транспортування сипучого матеріалу.

Корпус норії являє собою вертикальну шахту, яка захищає тяговий орган і матеріал від зовнішніх впливів та запобігає розсипанню матеріалу. Корпус зазвичай виконується з металевих листів та має ревізійні люки для обслуговування.

Основними технічними характеристиками норії є висота підйому, продуктивність, швидкість руху тягового органа, маса транспортованого матеріалу та потужність приводу. Для промислових норій висота підйому може становити від кількох метрів до десятків метрів, а продуктивність — від кількох тонн до сотень тонн на годину.

Вибір параметрів норії залежить від умов експлуатації та властивостей сипучого матеріалу. Висока продуктивність вимагає відповідної потужності електропривода та міцності механічних елементів.

Таким чином, конструкція та технічні характеристики норії безпосередньо впливають на вимоги до електропривода, зокрема до його потужності, режимів роботи та надійності.



Рисунок 1.1 Зовнішній вигляд норії Н-100

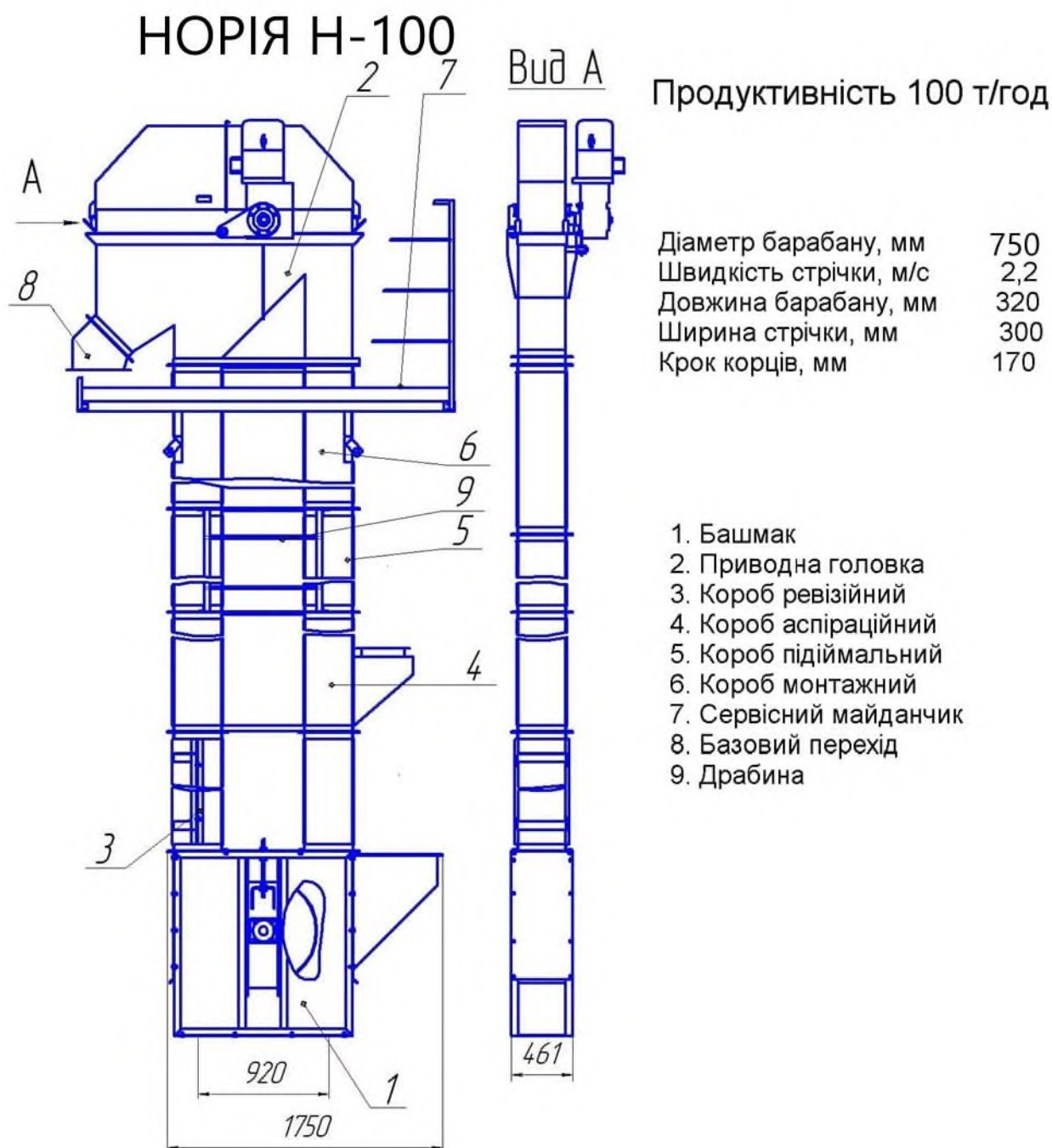


Рисунок 1.2 Конструкція норії Н-100

1.3 Загальна характеристика існуючого електропривода норії

Електропривод норії зазвичай виконується на основі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, який відзначається простотою конструкції, високою надійністю та невеликими експлуатаційними витратами. Електродвигун передає обертальний момент на приводний барабан через редуктор або безпосередньо, залежно від конструкції підйомника.

У традиційних схемах керування електроприводом застосовується прямий пуск електродвигуна від мережі. Такий спосіб пуску супроводжується значними пусковими струмами, які можуть у кілька разів перевищувати номінальні значення. Це створює додаткове навантаження на електричну мережу та призводить до підвищеного зносу механічних елементів приводу.

Крім того, відсутність регулювання швидкості обертання електродвигуна обмежує можливості оптимізації технологічного процесу. У випадку зміни продуктивності або властивостей матеріалу електропривод не може бути адаптований без зупинки обладнання.

Система захисту електропривода, як правило, включає теплові реле, автоматичні вимикачі та контактори. Проте такі засоби не завжди забезпечують достатній рівень захисту від перевантажень і аварійних режимів.

Основними недоліками існуючого електропривода норії є високі пускові струми, відсутність плавного пуску та регулювання швидкості, підвищені енергетичні втрати та зношування механічних вузлів. Усе це зумовлює необхідність модернізації електропривода з використанням сучасних систем керування, зокрема частотних перетворювачів.

Таблиця 1.1 Технічні дані норії Н-100

Найменування	Н-100
1. Продуктивність по зерну, т/год*	100
2. Шидкість стрічки, м/с	2,2
3. Ширина стрічки, мм	300
4. Крок для різних типів ковшів:	
- металевий	170
5. Кількість прокладок стрічки, шт.	4

6. Зовнішній розмір поперечного перерізу труб, мм	260 x 376
7. Діаметр барабану головки і черевика, мм	750
8. Довжина барабану, мм	320
9. Встановлена потужність при висоті норії:	
- до 30 метрів, кВт	11,0
10. Габаритні розміри головки норії з приводом, мм:	
- довжина	2 150
- ширина	1 250 - 1 400
- висота	1 663

Розділ 2 Розрахунок кінематичної схеми норії та вибір двигуна

2.1 Вимоги до автоматизованого електропривода норії

Електропривод норії повинен забезпечувати надійну та безперервну роботу підйомника при різних режимах навантаження. У процесі експлуатації норія працює у тривалому режимі з можливими перевантаженнями під час запуску та зміни подачі матеріалу, тому до електропривода висуваються підвищені вимоги щодо надійності та стабільності роботи.

Основними вимогами до електропривода є забезпечення плавного пуску і зупинки без динамічних ударів, обмеження пускових струмів, підтримання необхідної швидкості руху стрічки та захист від аварійних режимів. Також важливим є зниження споживання електроенергії та підвищення ресурсу механічних вузлів норії.

Виконання цих вимог досягається застосуванням автоматизованого електропривода з частотним керуванням асинхронним електродвигуном, що забезпечує плавне регулювання швидкості та захист обладнання.

2.2 Розрахунок кінематичної схеми норії

Кінематична схема електропривода визначає структуру передавання обертального руху від електродвигуна до приводного барабана норії та забезпечує узгодження частоти обертання електродвигуна зі швидкістю руху стрічки. Кінематична схема привода наведена на рис. 2.1.

До складу кінематичного ланцюга входять:

- 1 – асинхронний електродвигун;
- 2 – еластична муфта;
- 3 – двоступінчастий циліндричний редуктор;
- 4 – з'єднувальна муфта;
- 5 – приводний барабан норії.

Електродвигун є джерелом механічної енергії та створює обертальний рух, який через еластичну муфту передається на вхідний вал редуктора. Еластична муфта забезпечує компенсацію перекосів валів, зменшує динамічні навантаження та покращує умови роботи привода під час пуску і зупинки.

Редуктор виконує функцію зниження частоти обертання електродвигуна до значення, необхідного для роботи норії, а також збільшує крутний момент на вихідному валу. Двоступінчаста конструкція редуктора забезпечує рівномірний розподіл навантаження між зубчастими передачами та підвищує надійність роботи механізму.

Обертання з вихідного вала редуктора через з'єднувальну муфту передається на приводний барабан, який забезпечує рух стрічки з ковшами та транспортування сипучого матеріалу. Узгоджена робота всіх елементів кінематичного ланцюга забезпечує стабільну швидкість руху стрічки, необхідний крутний момент і надійну роботу норії.

Таким чином, прийнята кінематична схема привода, що складається з асинхронного електродвигуна, еластичних муфт, двоступінчастого циліндричного редуктора та приводного барабана, відповідає умовам роботи норії, забезпечує ефективну передачу механічної енергії та надійну експлуатацію електропривода.

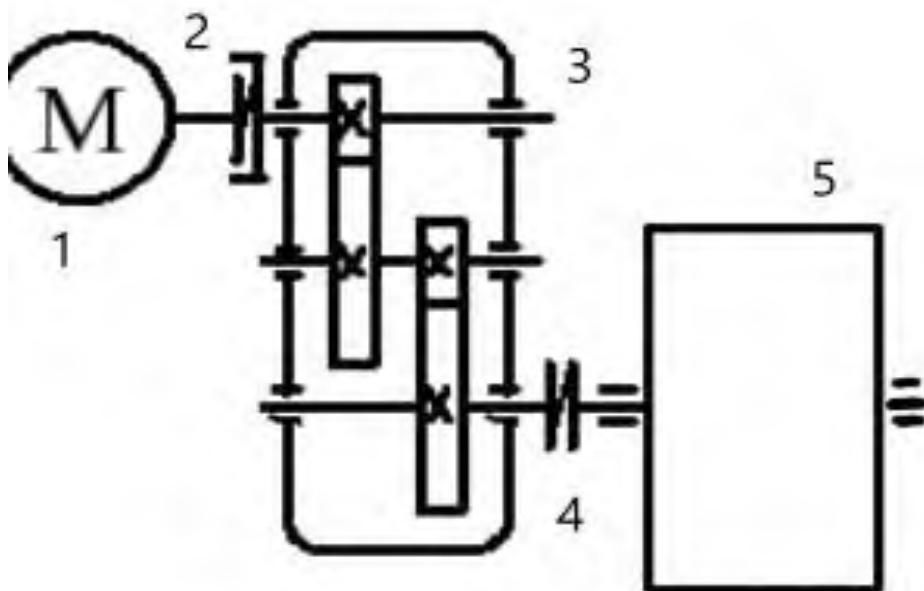


Рисунок 2.1 Кінематична схема електроприводу норії. 1 – електродвигун, 2 – з'єднувальна муфта, 3 – двохступінчастий редуктор, 4 – еластична муфта, 5 – приводний барабан норії.

З урахуванням прийнятої кінематичної схеми електропривода та технічних параметрів норії необхідно визначити основні енергетичні показники привода. Визначення потужності на валу приводного барабана є необхідним для подальшого вибору електродвигуна, редуктора та елементів електропривода.

Робота норії характеризується тяговим зусиллям, швидкістю руху стрічки та геометричними параметрами приводного барабана. Виходячи з цих параметрів визначається механічна потужність, необхідна для забезпечення руху стрічки та транспортування сипучого матеріалу.

Для подальших розрахунків приймаємо такі вихідні дані: тягове зусилля стрічки, швидкість її руху та діаметр приводного барабана. На основі цих параметрів визначається потужність на валу барабана, після чого

враховується коефіцієнт корисної дії механічної передачі для визначення необхідної потужності електродвигуна.

Таким чином, використовуючи вихідні технічні характеристики норії, переходимо до розрахунку потужності на валу приводного барабана та визначення загального ККД привода.

На першому етапі визначається необхідна механічна потужність на валу приводного барабана, яка забезпечує рух стрічки норії та транспортування сипучого матеріалу. Дане значення характеризує корисну потужність робочого органу без урахування втрат у механічній передачі.

Дані які потребуються:

Тягове зусилля $F = 4250$

Швидкість стрічки $V \text{ м/с} = 2,2$

Діаметр барабана $= 750 \text{ мм}$

Тягове зусилля стрічки норії визначається навантаженням від підйому матеріалу та сумарними опорами руху. Вихідні дані: продуктивність $Q = 100 \text{ т/год}$, швидкість стрічки $v = 2.2 \text{ м/с}$, висота підйому $H = 30 \text{ м}$.

Масова витрата матеріалу:

$$\dot{m} = \frac{Q}{3600} = \frac{100000}{3600} = 27.78 \text{ кг/с} \quad (1)$$

Лінійне завантаження стрічки (маса матеріалу на 1 м довжини):

$$m' = \frac{\dot{m}}{v} = \frac{27.78}{2.2} = 12.63 \text{ кг/м} \quad (2)$$

Вага матеріалу на підйомній гілці висотою H :

$$F_{\text{мат}} = m' \cdot g \cdot H = 12.63 \cdot 9.81 \cdot 30 \approx 3715 \text{ Н} \quad (3)$$

З урахуванням опорів руху (тертя в підшипниках і барабанах, опір зачерпування та розвантаження, нерівномірність наповнення ковшів) вводиться коефіцієнт $k = 1.14 \dots 1.20$. Приймаємо $k = 1.144$.

$$F = k \cdot F_{\text{мат}} = 1.144 \cdot 3715 \approx 4250 \text{ Н} \quad (4)$$

Отже, розрахункове тягове зусилля стрічки норії становить $F = 4250 \text{ Н}$.

Корисна потужність на валу приводного барабана визначається за відомим тяговим зусиллям і швидкістю стрічки:

$$P_{\text{вб}} = \frac{F \cdot V}{1000} = \frac{4250 \cdot 2,2}{1000} = 9,35 \text{ кВт} \quad (5)$$

Визначаємо ККД приводу

$$\eta_{\text{з}} = \eta_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{п}}^3 \cdot \eta_{\text{м}} = 0,97 \cdot 0,99 \cdot 0,97^2 = 0,90 \quad (6)$$

$\eta_{\text{р}}$ – ккд редуктора

$\eta_{\text{п}}$ – ккд підшипників (одна пара: вал приводного барабана)

$\eta_{\text{м}}$ – ккд муфти (дві муфти)

Надалі, з урахуванням коефіцієнта корисної дії приводу, виконується розрахунок необхідної потужності електродвигуна, яка повинна компенсувати втрати енергії в елементах приводу та забезпечити стабільну роботу норії.

$$P_{\text{д}} = \frac{P_{\text{вб}}}{\eta_{\text{з}}} = \frac{9,35}{0,90} = 10,3 \text{ кВт} \quad (7)$$

Частота обертання приводного барабана визначається із умови забезпечення необхідної лінійної швидкості руху стрічки норії. Зв'язок між швидкістю стрічки та частотою обертання барабана визначається через довжину кола барабана.

Оскільки за один оберт барабана стрічка переміщується на довжину його кола, частота обертання барабана визначається за виразом:

$$n_{\text{вб}} = \frac{60 \cdot 1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{60 \cdot 1000 \cdot 2,2}{\pi \cdot 750} = 56 \quad (8)$$

Оскільки на етапі кінематичного розрахунку конкретний тип електродвигуна ще не обрано, частота обертання приймається за типовим значенням

асинхронних електродвигунів загальнопромислового виконання. Для більшості електроприводів транспортних механізмів застосовуються чотириполюсні двигуни, синхронна частота обертання яких при частоті мережі 50 Гц становить 1500 об/хв. З урахуванням ковзання номінальна частота обертання приймається рівною приблизно 1450–1470 об/хв. У подальших розрахунках прийнято $n_d = 1450$ об/хв. З прийнятого n_d визначаємо передатне число редуктора

$$i_p = \frac{n_d}{n_{вб}} = \frac{1450}{56} = 25 \quad (9)$$

Виконуємо перевірку узгодженості передаточного числа з прийнятою частотою обертання двигуна:

$$n_d = n_{вб} * i_p = 56 * 25,9 = 1450 \text{ Об/хв} \quad (10)$$

Крутний момент на валу електродвигуна визначається за його потужністю та частотою обертання. Отримане значення характеризує момент, який створює двигун і передає на вхідний вал редуктора.

$$M_d = 9550 * \frac{P_{вб}}{n_d} = 9550 * \frac{10,3}{1450} = 67,8 \text{ Н * м} \quad (11)$$

При передачі обертального руху від двигуна до редуктора частина енергії втрачається в з'єднувальній муфті та підшипниках, що враховується відповідними коефіцієнтами корисної дії. Отримана потужність на вхідному валу редуктора є меншою за потужність двигуна.

$$P_1 = P_{вб} * \eta_m * \eta_p = 10,3 * 0,97 * 0,99 = 9,69 \text{ кВт} \quad (12)$$

$$M_1 = 9550 * \frac{P_1}{n_d} = 9550 * \frac{9,69}{1450} = 63,8 \text{ Н * м} \quad (13)$$

Редуктор знижує частоту обертання і одночасно збільшує крутний момент. Потужність на вихідному валу редуктора дещо зменшується через внутрішні втрати, однак за рахунок зниження обертів момент значно зростає, що забезпечує необхідне тягове зусилля привода.

$$n_2 = n_6 = 56 \quad (14)$$

$$P_2 = P_1 * \eta_{\Pi} = 9,69 * 0,97 = 9,39 \text{ кВт} \quad (15)$$

$$M_2 = 9550 * \frac{P_2}{n_{в6}} = 9550 * \frac{9,39}{56} = 1601,33 \text{ Н * м} \quad (16)$$

При передачі обертального руху від редуктора до приводного барабана враховуються втрати в муфті та підшипниках, унаслідок чого потужність і крутний момент незначно зменшуються. Отримане значення крутного моменту на валу барабана забезпечує переміщення стрічки норії та транспортування сипучого матеріалу.

$$n_3 = n_2 = 56 \quad (17)$$

$$P_3 = P_2 * \eta_{\Pi} = 9,39 * 0,97 = 9 \text{ кВт} \quad (18)$$

$$M_3 = 9550 * \frac{P_3}{n_{в6}} = 9550 * \frac{9}{56} = 1536,82 \text{ Н * м} \quad (19)$$

За результатами кінематичного розрахунку необхідне передаточне число привода становить $i \approx 26$. Оскільки редуктори виготовляються зі стандартного ряду передаточних чисел, прийнято найближче значення $i = 25$. Для привода обрано двоступінчастий циліндричний редуктор типу **1Ц2У-200-25** з номінальним крутним моментом на тихохідному валу $M_H = 2500 \text{ Н·м}$.

Необхідний розрахунковий момент на валу приводного барабана становить приблизно $M_3 = 1536 \text{ Н·м}$, що забезпечує коефіцієнт запасу за моментом $k \approx 1.67$. Такий запас є достатнім для привода норії, оскільки в процесі роботи можливі динамічні навантаження під час пуску та перевантаження. Відхилення швидкості від розрахункового значення компенсується застосуванням перетворювача частоти.

Таблиця 2.1 Редуктор

Типорозмір редуктора	Номінальне передатне число	Номінальний крутний момент	Об'єм оливи, л	Вага, кг	КПД
1Ц2У-200	8;10;12,5;16;20;25;31,5;40	2500	7	170	0,97



Рисунок 2.2 Зовнішній вигляд редуктора 1Ц2У-200

2.3 Вибір двигуна

За результатами проведеного розрахунку необхідна потужність електропривода норії становить близько 11 кВт, що відповідає умовам роботи підйомника та забезпечує необхідний запас по навантаженню. З урахуванням отриманих даних для приводу норії обрано асинхронний трифазний електродвигун з короткозамкненим ротором типу **AIP132M4** номінальною потужністю 11 кВт і частотою обертання 1460 об/хв. Вибір даного двигуна зумовлений його достатнім пусковим моментом, забезпечує надійний запуск норії навіть при підвищеному навантаженні. Двигун має високий коефіцієнт корисної дії, просту та надійну конструкцію, не потребує складного

обслуговування і добре пристосований до тривалого режиму роботи, характерного для транспортних механізмів. Номінальні параметри електродвигуна відповідають розрахованим значенням потужності, частоти обертання та крутного моменту, що забезпечує стабільну роботу електропривода без перевантаження та перевитрати електроенергії. Таким чином, обраний електродвигун АІР132М4 повністю відповідає технічним вимогам приводу норії та забезпечує надійну й економічно ефективну роботу установки.

Таблиця 2.2 Електродвигун

Характеристика електродвигуна	АІР132М4
Потужність	11 кВт
Частота обертання поля статора	1500 об/хв
Швидкість обертання валу	1450 об/хв
Тип	Асинхронний
Напруга живлення	Трифазне, 220/380 В, 380/660 В
Монтажне виконання	Лапи/фланець/комбіноване
Номінальний струм	22,343 А
ККД	88,1%
Номінальний крутний момент	72,671 Нм
Співвідношення моментів струму M_p/M_n	2,3
Співвідношення моменту сили M_{max}/M_n	2,3
Відношення струму I_p/I_n	7,0
Момент інерції	0,0349 кг·м ²
Діаметр валу	38 мм

Вага	86 кг
Передній/задній підшипник	6308 ZZ-C3
Рівень шуму	до 75 дБ



Рисунок 2.3 Зовнішній вигляд електродвигуна AIR132M4

2.4 Механічна характеристика двигуна

Механічна характеристика електродвигуна визначає залежність частоти обертання ротора від навантажувального моменту на валу та є важливим показником, що характеризує пускові та робочі властивості електропривода. Для приводу норії застосовано асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором типу AIR132M4, який має жорстку механічну характеристику, тобто при зміні навантаження частота обертання змінюється незначно. Це забезпечує стабільну швидкість руху стрічки норії та рівномірність транспортування сипучого матеріалу.

Номінальний крутний момент двигуна відповідає розрахованим значенням і забезпечує роботу електропривода в тривалому режимі без перевантаження. Пусковий момент двигуна перевищує номінальний приблизно у 2,3 рази, що дозволяє здійснювати надійний запуск норії навіть при наявності матеріалу в ковшах та підвищеному навантаженні на валу.

					КРБ.АТЕРС.1.641-03.1.2	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		23

Максимальний момент також перевищує номінальний, що забезпечує стійкість роботи двигуна та запобігає його зупинці при короткочасних перевантаженнях.

Механічна характеристика асинхронного двигуна є спадною, при цьому у робочій зоні вона має достатню жорсткість, що гарантує стабільність частоти обертання та надійну роботу електропривода норії. Отримані параметри підтверджують, що обраний електродвигун повністю відповідає умовам експлуатації, забезпечує необхідний пусковий момент і надійну роботу привода у всьому діапазоні навантажень.

Формула критичного ковзання

$$S_k = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} = \frac{0.36}{\sqrt{(0.5^2 + (0.56 + 0.938)^2)}} = 0.23 \quad (20)$$

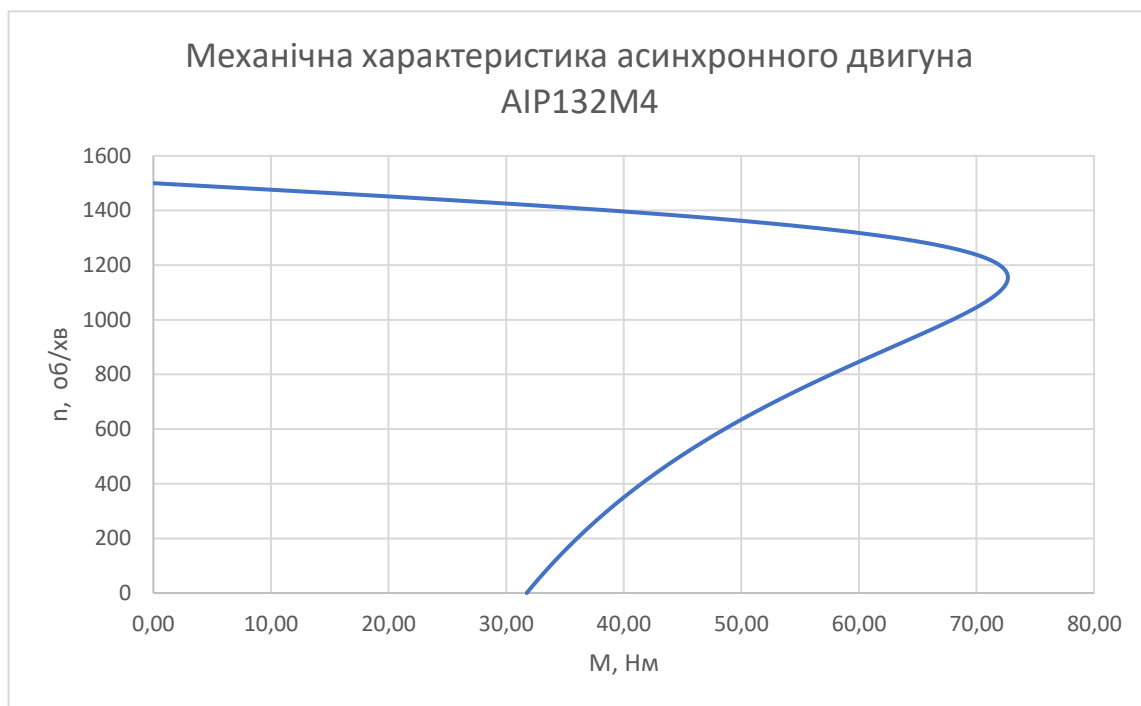


Рисунок 2.4 – Механічна характеристика двигуна AIP132M4

2.5 Розрахунок кабелю живлення двигуна норії

Вибір кабелю живлення електропривода норії здійснюється за умовою допустимого струмового навантаження, втрат напруги та умов експлуатації.

Номінальний струм обраного електродвигуна становить 22,5 А. З урахуванням необхідного запасу за струмом, що враховує можливі

перевантаження та тривалий режим роботи, розрахунковий струм приймається на рівні 27 А.

Відповідно до отриманого значення струму та умов прокладання було обрано силовий мідний кабель типу ВВГнг-LS перерізом 4×4 мм². Обраний кабель забезпечує допустиме тривале струмове навантаження, що перевищує розрахунковий струм електродвигуна, та має достатній запас по нагріванню. Ізоляція кабелю не поширює горіння та характеризується зниженим димовиділенням, що підвищує пожежну безпеку під час експлуатації. Переріз струмопровідних жил забезпечує допустимі втрати напруги, які не впливають на роботу електродвигуна.

Прокладання кабелю передбачається стаціонарним способом від шафи керування до електродвигуна норії. Кабель розміщується в металевому кабельному лотку або захисній трубі з метою механічного захисту від пошкоджень та впливу зовнішнього середовища. Прокладання виконується з урахуванням мінімальних радіусів вигину, недопущення натягу та механічних напружень у кабелі. У місцях підключення до електродвигуна і шафи керування передбачається встановлення кабельних вводів і надійне кріплення кабелю для запобігання його пошкодженню та послабленню контактів.

Розміщення кабелю виконується на безпечній відстані від рухомих частин норії, джерел нагріву та зон можливого механічного впливу. У разі прокладання поруч з іншими силовими кабелями забезпечується допустимий тепловий режим і відсутність взаємного перегріву.

Таким чином, обраний кабель типу ВВГнг-LS 4×4 мм² та спосіб його прокладання забезпечують надійну, безпечну та довготривалу експлуатацію електропривода норії.

					КРБ.АТЕРС.1.641-03.1.2	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		25

2.6 Вибір захисту та управління приводом норії

Надійна та безпечна робота електропривода норії забезпечується застосуванням комплексу апаратів захисту та управління, які виконують функції комутації, контролю режимів роботи та захисту від аварійних ситуацій. Вибір апаратури здійснювався з урахуванням номінального струму електродвигуна, умов експлуатації та вимог до надійності роботи привода.

Розрахований струм з запасом:

$$I=22,3*1,2= 26.76 \text{ А.} \quad (21)$$

Для захисту силового кола від струмів короткого замикання та перевантаження обрано автоматичний вимикач триполюсного виконання з номінальним струмом 32 А. Даний апарат забезпечує швидке відключення живлення у випадку аварійних режимів, запобігає пошкодженню електрообладнання та підвищує електробезпеку установки. Номінальний струм автоматичного вимикача обрано з урахуванням пускових струмів двигуна та необхідного запасу.

Комутація силового кола електропривода здійснюється за допомогою електромагнітного контактора, розрахованого на роботу в категорії застосування АС-3. Контактор забезпечує дистанційне вмикання та вимикання електродвигуна, надійність роботи та можливість інтеграції у схему автоматичного керування.

Для захисту електродвигуна від порушення симетрії живлення, зникнення або неправильного чергування фаз застосовується реле контролю фаз. Даний пристрій запобігає роботі електродвигуна в аварійних режимах, що можуть призвести до перегріву обмоток, зниження ресурсу або виходу двигуна з ладу. У системі управління електроприводом передбачені кнопкові пости керування, що забезпечують подачу команд «Пуск» та «Стоп», а також можливість аварійного вимкнення. Робота електропривода координується частотним перетворювачем, який забезпечує плавний пуск, регулювання

швидкості та додатковий захист електродвигуна від перевантаження і перегріву.

Таким чином, обраний комплекс апаратів захисту та управління забезпечує безпечну, надійну та стабільну роботу електропривода норії, захист електрообладнання від аварійних режимів та ефективне керування процесом транспортування сипучого матеріалу.

Таблиця 2.3 Апаратура і захист

№	Найменування пристрою	Призначення	Вибрана марка / тип	Технічні характеристики
1	Автоматичний вимикач	Захист лінії живлення та ПЧ від струмів КЗ	Schneider iC60N C32 або ABB S203 C32	3Р, Ном. Струм 32 А , характеристика C , здатність 6 кА
2	Електромагнітний контактор	Гальванічне роз'єднання кола живлення при аварії	Schneider LC1D32 або ABB AF30-30-00	Ном. Струм 32 А (АС-3), котушка керування 230 В АС
3	Реле контролю фаз	Захист від перекосу та зникнення фаз на вході в шафу	Schneider RM22TG20 або ABB CM-PVE	Напруга 380-400 В, контроль чергування та обриву фаз

2.7 Вибір ПЧ для двигуна приводу норії

Вибір перетворювача частоти для приводу норії здійснюється на основі номінальних параметрів електродвигуна та характеру навантаження.

Оскільки привід відноситься до механізмів із постійним моментом опору, основним критерієм є забезпечення необхідного пускового моменту та перевантажувальної здатності.

$$I_{ПЧ}=22,3*1,2= 26.76 \text{ А.} \quad (22)$$

Обраний для електропривода норії частотний перетворювач **Siemens SINAMICS V20** призначений для керування асинхронними електродвигунами змінного струму в промислових установках загального призначення. Перетворювач розрахований на роботу з трифазною мережею живлення напругою 380 В і номінальною потужністю 11 кВт, що повністю відповідає параметрам обраного електродвигуна типу AIP132M4.

Номінальний вихідний струм частотного перетворювача становить 31 А, що забезпечує надійну роботу двигуна в номінальному режимі та має достатній запас для короточасних перевантажень. Діапазон регулювання вихідної частоти становить до 600 Гц, що дозволяє реалізувати широкий спектр режимів керування швидкістю обертання електродвигуна. У даному електроприводі регулювання частоти використовується в робочому діапазоні, необхідному для забезпечення оптимальної швидкості руху стрічки норії.

Частотний перетворювач працює в режимі скалярного керування, який є оптимальним для транспортних механізмів, таких як норії, де не вимагається високоточне позиціонування або складні динамічні режими. Скалярне керування забезпечує стабільний крутний момент у широкому діапазоні швидкостей та простоту налаштування системи.

Перетворювач оснащений вбудованими функціями захисту електродвигуна і силової частини, зокрема захистом від перевантаження, перегріву, короткого замикання, перенапруги та зниження напруги живлення. Це дозволяє підвищити надійність електропривода та зменшити ймовірність аварійних відмов під час експлуатації. Наявність вбудованого фільтра класу С3 забезпечує зниження електромагнітних завад та відповідність вимогам електромагнітної сумісності.

Конструктивно частотний перетворювач має компактні габаритні розміри, що дозволяє розмістити його в стандартній шафі керування. Ступінь захисту IP20 забезпечує захист від потрапляння твердих частинок та допускає експлуатацію в умовах закритих електрощитів. Робочий температурний діапазон від 0 до +40 °С відповідає умовам промислового середовища.

Перетворювач підтримує стандартні промислові протоколи зв'язку Modbus RTU та USS, що забезпечує можливість інтеграції електропривода норії в систему автоматизованого керування підприємства. Керування перетворювачем може здійснюватися як з панелі керування, так і дистанційно через зовнішні сигнали.

Таким чином, частотний перетворювач Siemens SINAMICS V20 має необхідні технічні та експлуатаційні характеристики для застосування в електроприводі норії, забезпечує надійне керування асинхронним електродвигуном, ефективний захист обладнання та стабільну роботу установки в заданих технологічних режимах.

Таблиця 2.4 Перетворювач частоти

Модель	6SL3210-5BE31-5CV0
Серія	Sinamics V20
Виробник	Siemens
Номинальна потужність	15 кВт
Вхідна фазність	3-ф / 380 В
Вихідна фазність	3-ф / 380 В
Номинальний струм	31 А
Ступінь захисту	20 IP
Вихідна частота	600 Гц
Робоча температура	0 до +40°C
Комунікація	Modbus RTU, USS
Вбудований фільтр	фільтр класу С3
Режим керування двигуном	Скалярний
Глибина	173 мм
Висота	240 мм
Ширина	207 мм



Рисунок 2.5 Зовнішній вигляд ПЧ

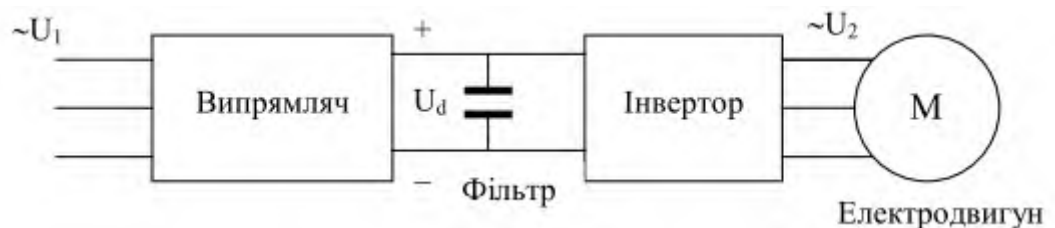


Рисунок 2.6 Принципова схема ПЧ

2.8 Схема частотного керування електропривода норії системи ПЧ-АД

Для забезпечення плавного пуску, регулювання швидкості руху стрічки та зменшення енергоспоживання у приводі норії застосовується система частотного керування на базі перетворювача частоти та асинхронного двигуна. Використання перетворювача частоти дозволяє змінювати частоту і напругу живлення електродвигуна, забезпечуючи оптимальний режим роботи привода.

Функціональна схема частотного керування наведена на рисунку 2.6.

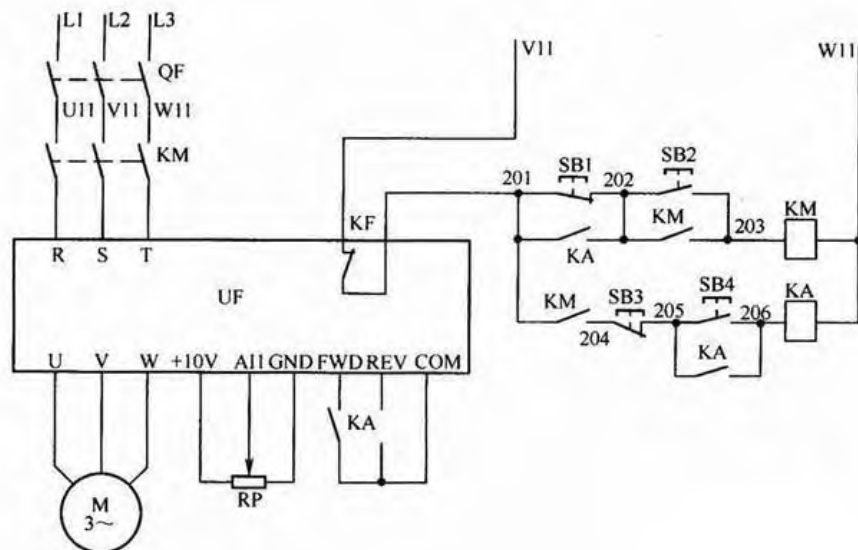


Рисунок 2.6 Схема керування електродвигуна з ПЧ

На рисунку 2.6 наведена **типова схема частотного керування** асинхронного електропривода норії з використанням перетворювача частоти (ПЧ). Схема реалізована за стандартною конфігурацією «ПЧ — контактор живлення — двигун — органи керування» і забезпечує плавний пуск, реверс обертання, регулювання швидкості та захист привода.

Живлення трифазної мережі подається на вхід перетворювача частоти UF через автоматичний вимикач QF та силовий контактор KM (в клеми R, S, T). Перетворювач частоти формує вихідну змінну напругу та частоту, що дозволяє плавно регулювати швидкість обертання асинхронного двигуна M без значних пускових струмів.

Силові вихідні клеми ПЧ (U, V, W) через контактор KM підключено до обмоток двигуна. Додатково між ПЧ і двигуном може бути встановлено вимірювальний резистор RP для зворотного зв'язку по швидкості чи токах (якщо передбачено в технічних вимогах керування).

Керування приводом здійснюється з панелі керування, де:

- **SB1** — кнопка «Пуск вперед» подає команду на включення контактора KM у напрямку обертання вперед;
- **SB3** — кнопка «Пуск назад» включає зворотний напрямок обертання двигуна через логіку реле або управляючі входи ПЧ (суттєво для зміни напрямку обертання стрічки норії);

- **SB2 і SB4** — кнопки «Стоп» виконують вимкнення двигуна, розмикаючи схему управління;
- **КА** — реле логіки взаємоблокувань, що виключає одночасне подання команд FWD і REV і забезпечує безпечну роботу привода.

Регулювання швидкості обертання здійснюється потенціометром RP, підключеним до аналогового входу ПЧ (AI1), що дозволяє оператора плавно задавати частоту обертання двигуна залежно від технологічних вимог (швидкість стрічки, продуктивність тощо).

Схема містить також елементи захисту: автоматичний вимикач QF — від коротких замикань і перевантажень у мережі, а сам перетворювач частоти — від перевантаження двигуна, підвищеної температури, відсутності фаз живлення і аварійних станів.

Розділ 3 Моделювання роботи електропривода норії в середовищі MATLAB/SIMULINK

3.1 Постановка задачі моделювання роботи електропривода норії

Метою моделювання є дослідження електромеханічних процесів у системі електропривода вертикального ковшового підйомника (норії) та оцінка впливу способу керування на пускові й усталені режими роботи. Особлива увага приділяється аналізу динаміки розгону, величини пускових струмів, електромагнітного моменту та встановленої швидкості обертання двигуна.

Об'єктом моделювання є електропривод норії на базі асинхронного короткозамкненого двигуна типу AIP132M4 з живленням від трифазної мережі змінного струму. У межах роботи розглядаються два режими: прямий пуск двигуна від мережі та пуск із застосуванням перетворювача частоти.

Для реалізації моделі використано середовище MATLAB/Simulink з бібліотекою Simscape Electrical. Математична модель асинхронного двигуна побудована на основі еквівалентної Т-подібної схеми заміщення з

одноклітковим ротором. Параметри моделі визначені за паспортними даними двигуна та розрахунком параметрів схеми заміщення.

У процесі моделювання вирішуються такі задачі:

- аналіз електромагнітних і механічних процесів при прямому пуску двигуна;
- дослідження пускових струмів та електромагнітного моменту;
- визначення часу розгону та характеру зміни швидкості;
- моделювання роботи електропривода з використанням перетворювача частоти;
- порівняння динамічних характеристик системи при різних способах пуску;
- оцінка впливу частотного керування на зменшення пускових навантажень та стабільність роботи електропривода норії.

Результати моделювання використовуються для підтвердження доцільності застосування частотно-регульованого електропривода та аналізу покращення електромеханічних характеристик системи.

3.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення двигуна електропривода норії

Для побудови математичної моделі асинхронного двигуна в середовищі MATLAB/Simulink необхідно визначити параметри еквівалентної Т-подібної схеми заміщення. Дана схема дозволяє описати електромагнітні процеси в двигуні та використовується для моделювання його динамічних і усталених режимів роботи.

У роботі прийнято однокліткову еквівалентну схему асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, яка є стандартною для двигунів загального промислового призначення. Параметри схеми заміщення визначені на основі паспортних даних двигуна AIP132M4

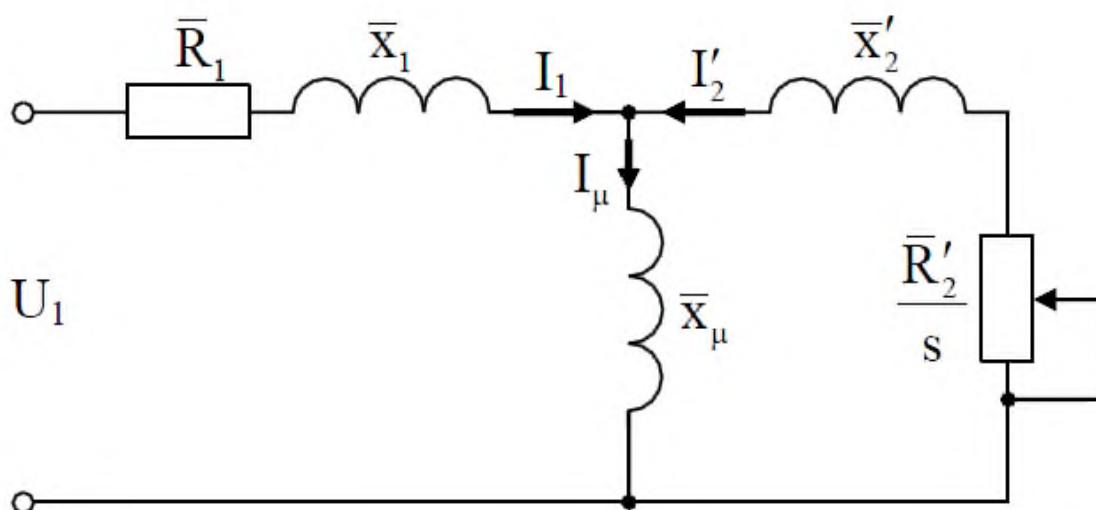


Рисунок 3.1 Т-подібна схема заміщення

Еквівалентна схема заміщення двигуна на фазу включає:

- активний опір статора R_1 ;
- реактивний опір розсіювання статора X_1 ;
- активний опір ротора, приведений до статора R_2' ;
- реактивний опір розсіювання ротора X_2' ;
- реактивний опір намагнічування X_m .

Параметри схеми заміщення асинхронного двигуна були прийняті за результатами розрахунку, наведеного у науковій роботі “**Mathematical modeling of an induction motor for vehicles**”. У зазначеній роботі виконано математичне моделювання асинхронного двигуна типу **AIP132M4** з номінальною потужністю **11 кВт**.

У статті наведені основні номінальні параметри двигуна, а також розраховані параметри еквівалентної схеми заміщення, зокрема активні опори та реактивні опори статора і ротора, а також індуктивний опір контуру намагнічування. Ці параметри були використані для побудови математичної моделі двигуна та подальшого моделювання його роботи.

Оскільки у роботі використовується той самий тип двигуна, наведені параметри схеми заміщення були прийняті як вихідні дані для моделювання в

середовищі **MATLAB/Simulink**. Це дозволяє отримати характеристики двигуна, що відповідають його реальним експлуатаційним параметрам.

Таблиця 3.1 Параметри двигуна

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці вимірювання
Активний опір статора	R_1	0.5	Ом
Приведений активний опір ротора	R'_2	0.36	Ом
Індуктивний опір розсіювання статора	X_1	0.56	Ом
Приведений індуктивний опір ротора	X'_2	0.938	Ом
Індуктивний опір контуру намагнічування	X_m	22.828	Ом

У джерелі параметри схеми заміщення асинхронного двигуна наведені у вигляді **реактивних опорів X** . Однак при моделюванні в середовищі **MATLAB/Simulink** у блоці асинхронного двигуна задаються **індуктивності** відповідних елементів схеми.

Тому реактивні опори статора, ротора та магнітної гілки були перетворені в індуктивності за співвідношенням:

Індуктивність статора

$$L_1 = \frac{X_1}{2\pi f} = \frac{0,56}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.0017 \text{ Гн} \quad (23)$$

Індуктивність ротора

$$L'_2 = \frac{X'_2}{2\pi f} = \frac{0,938}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.003 \text{ Гн} \quad (24)$$

Індуктивність гілки намагнічування

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} = \frac{22.828}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.072 \text{ Гн} \quad (25)$$

Отримані результати підтверджують відповідність математичної моделі реальному двигуну. Сформована база параметрів є достатньою для детального дослідження струмів, електромагнітного моменту та динамічних характеристик привода норії в усіх експлуатаційних режимах

3.3 Моделювання прямого пуску електродвигуна електропривода норії

Для оцінки динамічних режимів роботи електропривода норії виконано моделювання прямого пуску асинхронного двигуна від трифазної мережі змінного струму. Моделювання проведено в середовищі MATLAB/Simulink із використанням математичної моделі двигуна, побудованої на основі еквівалентної схеми заміщення.

Прямий пуск є найпростішим способом запуску асинхронного двигуна, при якому напруга мережі безпосередньо подається на обмотки статора. Такий спосіб супроводжується значними пусковими струмами, підвищеним електромагнітним моментом і динамічними навантаженнями на механічну частину привода.

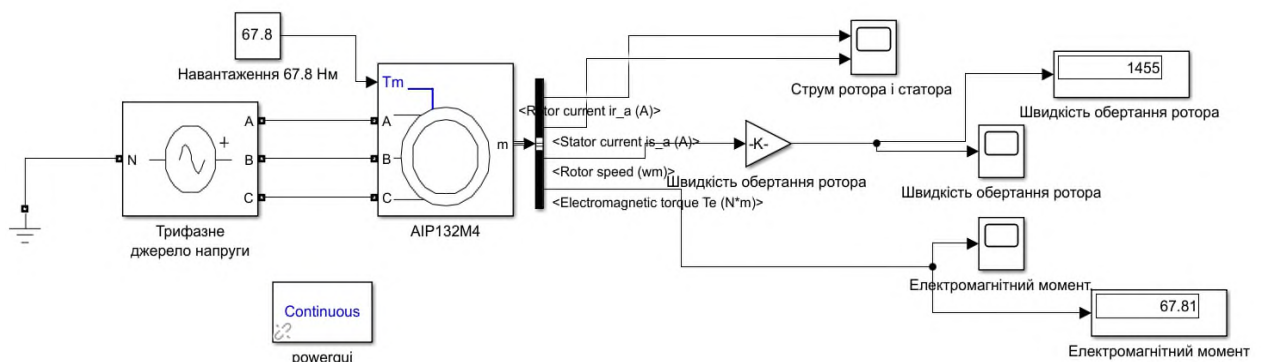


Рисунок 3.2 Модель прямого пуску електродвигуна

Модель відтворює пусковий та номінальний режими роботи асинхронного двигуна.

Для моделювання прямого пуску використано модель електропривода рисунок 3.2, що складається з трифазного джерела напруги, математичної моделі асинхронного двигуна та навантаження у вигляді постійного моменту опору. Механічне навантаження на вал двигуна прийнято рівним $T_H = 61,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$, що відповідає розрахованому робочому режиму електропривода норії.

У блоці двигуна використані параметри асинхронного двигуна AIP132M4.

Block Parameters: AIP132M4

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Load Flow

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]: [11e3, 380, 50] [...]

Stator resistance and inductance [Rs(ohm) Lls(H)]: [0.5 0.0017] [0.5,0.0017]

Rotor resistance and inductance [Rr'(ohm) Llr'(H)]: [0.36 0.003] [0.36,0.003]

Mutual inductance Lm (H): 0.072

Inertia, friction factor, pole pairs [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]: [0.0349 0 2] [0.0349,0,2]

Initial conditions

[slip, th(deg), ia,ib,ic(A), pha,phb,phc(deg)]:

[1,0 0,0,0 0,0,0] <1x8 double>

☐ Simulate saturation Plot

[i(Arms) ; v(VLL rms)]: 51, 302.9841135, 428.7778367 ; 230, 322, 414, 460, 506, 552, 598, 644, 690]

OK Cancel Help Apply

Рисунок 3.3 Блок двигуна

Трифазне джерело напруги з параметрами $U = 380 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$ безпосередньо підключене до обмоток статора двигуна, що відповідає

режиму прямого пуску. Для аналізу електромеханічних процесів у моделі реалізовано вимірювання струмів статора та ротора, швидкості обертання ротора і електромагнітного моменту двигуна.

У результаті моделювання встановлено, що після завершення перехідного процесу швидкість обертання двигуна становить приблизно $n = 1460$ об/хв, що відповідає номінальному режиму роботи асинхронного двигуна з урахуванням ковзання. Електромагнітний момент у сталому режимі дорівнює приблизно $T_e = 61$ Н·м, що забезпечує компенсацію моменту навантаження та стабільну роботу електропривода норії.

Отримані результати підтверджують коректність побудованої математичної моделі та адекватність вибраних параметрів схеми заміщення двигуна.

Аналіз отриманих результатів

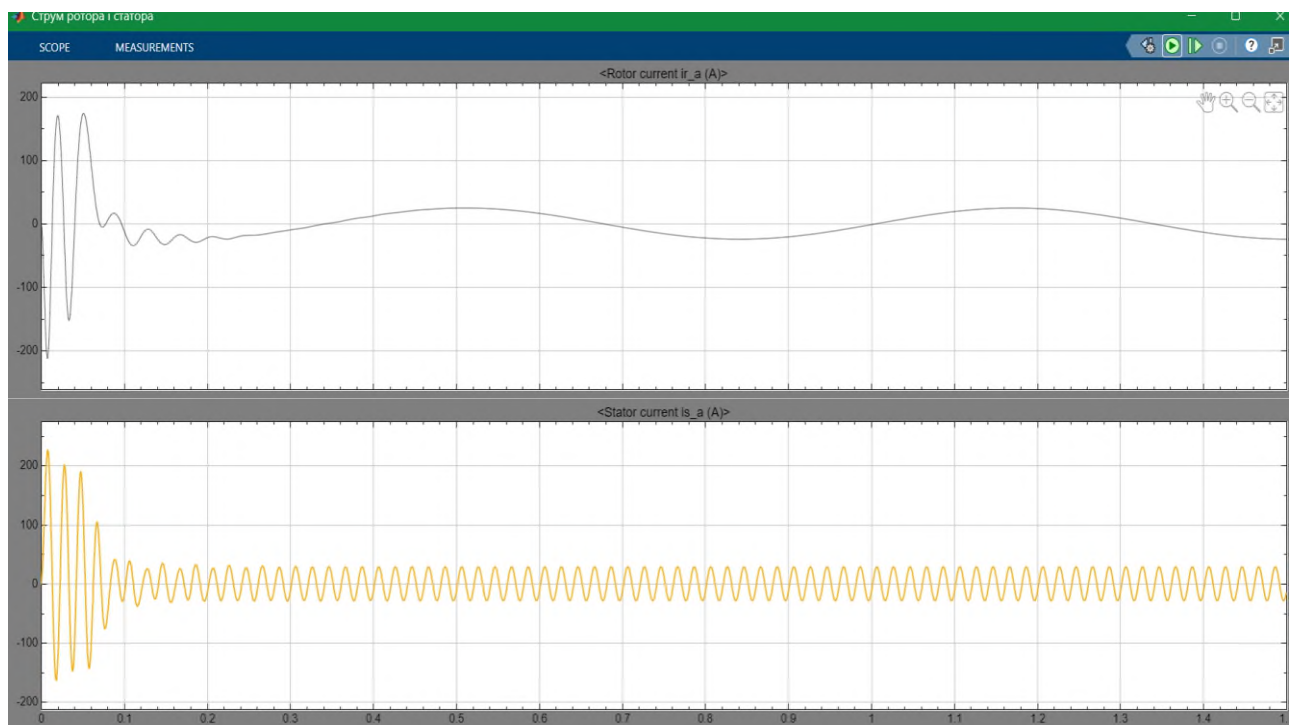


Рисунок 3.4 Струм ротора і статора

1. Аналіз перехідного процесу в статорі (i_{s_a})

Нижня осцилограма відображає зміну миттєвих значень фазного струму статора. Процес пуску можна розділити на декілька етапів:

- **Ударний струм:** У початковий момент часу ($t=0$ с) спостерігається різке зростання струму, зумовлене наявністю аперіодичної складової. Пікове значення сягає приблизно **240 А**, що відповідає кратності пускового струму $I_{\text{п}}/I_{\text{ном}} \approx 7.5$. Це корелює з паспортними даними двигунів серії АИР даної потужності.
- **Етап розгону:** Протягом інтервалу $0 < t < 0.7$ с амплітуда струму залишається високою, що зумовлено великим значенням ковзання (s). В цей період спостерігається інтенсивне споживання реактивної потужності на створення магнітного поля та активної — на подолання моменту інерції ротора та навантаження.
- **Вихід на сталий режим:** Після моменту $t \approx 0.8$ с амплітуда струму різко знижується до номінального значення (або значення струму навантаження), що свідчить про завершення розгону двигуна.

2. Аналіз процесів у роторному колі (i_{r_a})

Верхня осцилограма демонструє струм ротора, приведений до статора.

Основною характеристикою тут є зміна частоти струму:

- **Частотна залежність:** На початку пуску, коли ротор нерухомий ($n=0$, $s=1$), частота струму ротора дорівнює частоті мережі ($f_2 = f_1 = 50$ Гц). Це підтверджується високою щільністю коливань на графіку в початковій фазі.
- **Зменшення частоти та амплітуди:** У міру збільшення кутової швидкості ротора частота струму ротора зменшується відповідно до виразу $f_2 = s \cdot f_1$. На осцилограмі це візуалізується як «розтягування» синусоїди в часі.
- **Робота в сталому режимі:** Після досягнення робочої швидкості ($s \approx 0.03 \dots 0.05$) частота роторного струму стає дуже низькою (1.5 ... 2.5 Гц), що ми бачимо як плавні низькочастотні коливання наприкінці графіку.

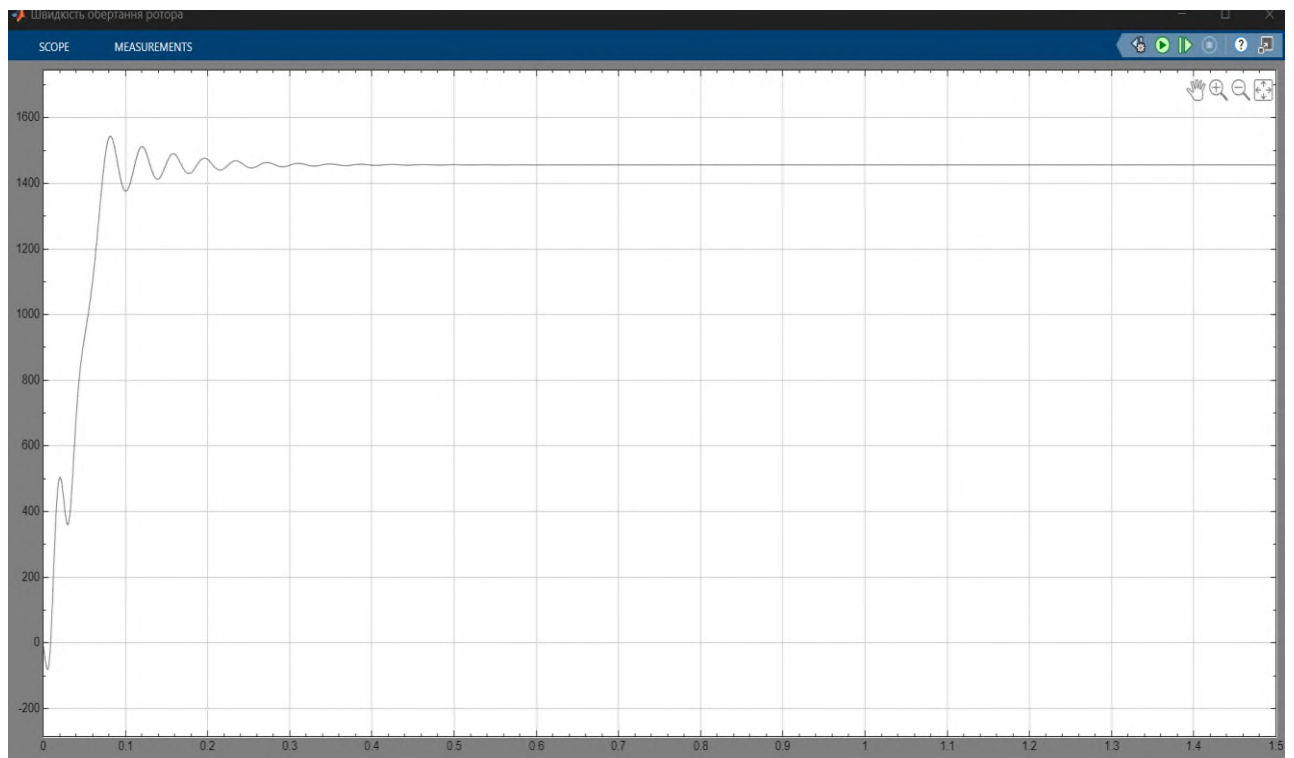


Рисунок 3.5 Оберти ротора

На рисунку 3.5 наведено часову залежність частоти обертання ротора $n = f(t)$ двигуна АІР132М4. Аналіз даної осцилограми дозволяє оцінити прийомистість електропривода та якість перехідного процесу.

1. Початковий етап та інтенсивність розгону

- Початкові коливання: В інтервалі $t = 0 \dots 0.05\text{с}$ спостерігаються незначні коливання швидкості навколо нульової позначки. Це зумовлено дією знакозмінного електромагнітного моменту, що виникає через затухання вільних складових магнітного потоку статора в момент подачі напруги.
- Темп прискорення: Після завершення чисто електричного перехідного процесу ($t > 0.05\text{с}$) двигун демонструє інтенсивний розгін. Швидкість зростає майже лінійно, що свідчить про значний надлишковий момент (різницю між електромагнітним моментом двигуна та моментом опору навантаження).

2. Динамічні показники перехідного процесу

- Перерегулювання (Overshoot): Спостерігається характерний «вибіг» швидкості вище синхронної позначки — пікове значення сягає приблизно 1500 об/хв. Це явище є типовим для динамічних моделей АД і пояснюється енергією, накопиченою в індуктивностях машини, та інерційністю ротора.
- Затухаючі коливання: Після пікового значення швидкість здійснює декілька коливань навколо сталого значення. Процес має характер затухаючих коливань, що свідчить про стійкість системи.
- Час розгону: Час виходу на сталу швидкість (час регулювання) становить приблизно 0.4–0.45 с. Це швидше, ніж повне затухання низькочастотних пульсацій струму ротора, оскільки основна механічна робота виконується саме в цей проміжок.

3. Сталий режим та ковзання

- Стала швидкість: Після затухання перехідного процесу ($t > 0.6$ с) швидкість стабілізується на рівні приблизно 1455 об/хв.
- Розрахунок ковзання: Враховуючи, що синхронна швидкість для даного двигуна $n = 1500$ об/хв (при $f = 50$ Гц та $p = 2$), розрахункове ковзання у сталому режимі становить:

$$s = \frac{n_n - n}{n_n} = \frac{1500 - 1455}{1500} = 0.03 \quad (26)$$

Дане значення відповідає роботи двигуна АИР132М4 під навантаженням 67.8 Нм.

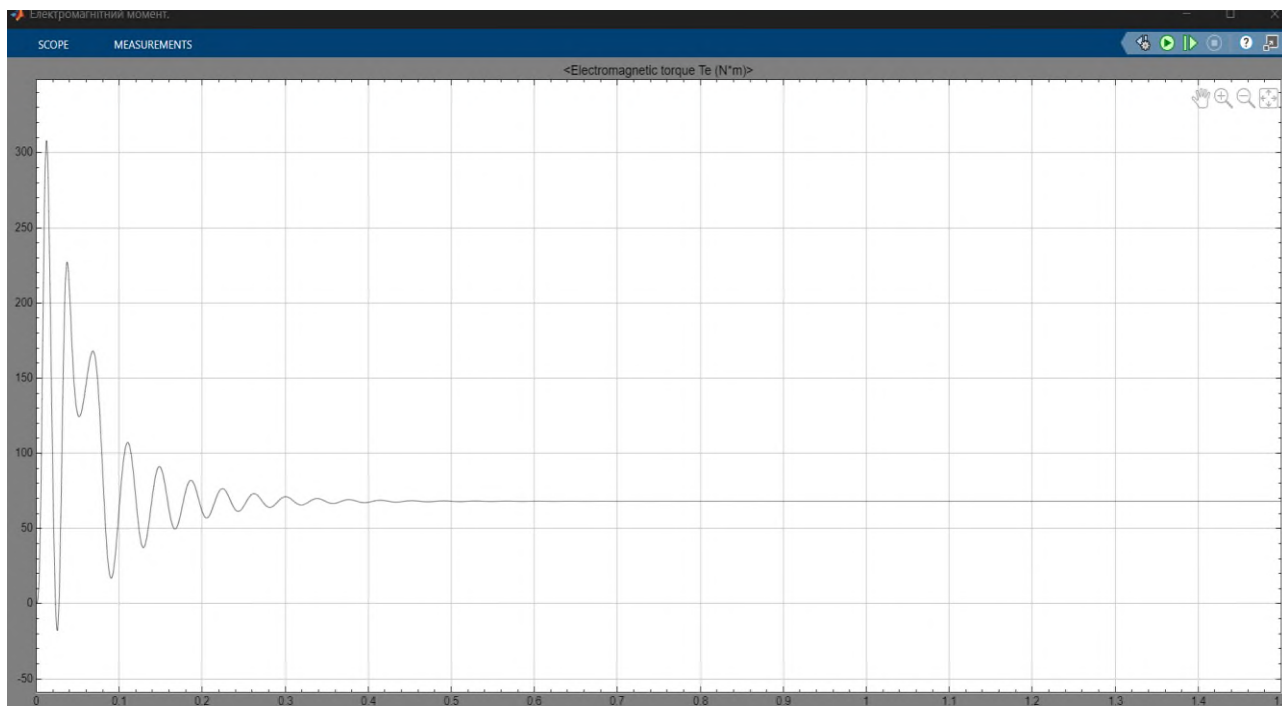


Рисунок 3.6 Електромагнітний момент

Для дослідження роботи електропривода було обрано режим роботи з постійним статичним моментом опору $M_c = 67.8$ Нм, що становить приблизно **93.6% від номінального моменту** двигуна АІР132М4 ($M_{ном} = 72.6$ Нм). Таке навантаження відповідає робочому режиму, близькому до номінального.

1. Електромагнітний момент та умови рівноваги

Згідно з осцилограмою (Рис. 3.6), після завершення перехідного процесу ($t > 0.6$ с) електромагнітний момент двигуна стабілізується на позначці **67.8 Нм**.

- Це повністю відповідає основному рівнянню динаміки електропривода в сталому режимі: $M = M_c$, де прискорення $dn/dt = 0$.
- Кратність ударного моменту відносно заданого робочого навантаження становить: $K_{уд} = 310/67.8 = 4.57$.

2. Частота обертання та ковзання

При заданому моменті $M_c = 67.8$ Нм швидкість ротора у сталому режимі зафіксована на рівні **1455 об/хв**.

Отримане значення ковзання є меншим за номінальне ($s_{ном} = 3.3\%$), що фізично обґрунтовано меншим рівнем навантаження на валу (67.8 Нм замість

72.4 Нм). Це підтверджує високу чутливість та адекватність побудованої математичної моделі.

3. Стационарний струм статора

Оскільки двигун працює з навантаженням $0.936 P_{ном}$, амплітуда фазного струму статора в сталому режимі (після 0.8 с) становить приблизно **29–30 А**.

- Враховуючи, що для АИР132М4 $I_{ном} = 22.3 \text{ А}$ (діюче значення), амплітуда номінального струму має бути $22 \cdot \sqrt{2} \approx 31.1 \text{ А}$.
- Таким чином, модель демонструє пропорційне зниження споживання струму відповідно до зниження моменту навантаження.

Висновок по прямому пуску двигуна АИР132М4

Виконане математичне моделювання прямого пуску асинхронного двигуна **АИР132М4** при статичному навантаженні $M_c = 67.8 \text{ Н}\cdot\text{м}$ дозволяє зробити наступні висновки щодо динамічних та статичних властивостей системи:

1. Енергетичні та силові показники пуску

Прямий пуск характеризується значними перевантаженнями, що є типовим для машин даної серії:

- **Максимальний пусковий струм:** Сягає амплітудного значення **240 А**, що у **7.7 рази** перевищує амплітуду номінального струму статора. Це свідчить про необхідність перевірки живильної мережі на термічну стійкість та вибору відповідної апаратури захисту.
- **Ударний електромагнітний момент:** Становить **310 Н·м**, що у **4.57 рази** більше за заданий момент опору. Наявність короткочасного знакозмінного моменту в перші 0.1 с вказує на високі механічні напруження в шпонкових з'єднаннях та муфтах привода.

2. Показники якості перехідного процесу

Аналіз кривої швидкості та струму ротора підтверджує стійкість та керованість системи:

- **Тривалість розгону:** Час виходу на сталу швидкість становить **0.75 с**. Це оптимальний показник, який забезпечує швидке досягнення робочого режиму без критичного перегріву обмоток.

- **Динаміка швидкості:** Перерегулювання за швидкістю становить приблизно **2.6%** ($n_{\max} \approx 1540$ об/хв), що є допустимим для більшості промислових механізмів.

3. Аналіз усталеного режиму

При заданому навантаженні $M_c = 67.8$ Н·м (93.6% від номіналу) двигун працює в межах паспортних характеристик:

- **Робоча частота обертання:** Становить **1455 об/хв**.
- **Стале ковзання:** Дорівнює **3.07%**, що підтверджує високу енергоефективність двигуна в даному робочому режимі.
- **Струм ротора:** Зниження частоти струму ротора до значення $f_2 = s \cdot f_1 \approx 1.5$ Гц наприкінці моделювання підтверджує вихід двигуна на жорстку ділянку механічної характеристики.

3.4 Моделювання пуску електродвигуна електропривода норії з ПЧ

Для дослідження режимів роботи електропривода норії було виконано моделювання процесу пуску асинхронного електродвигуна з використанням перетворювача частоти. Метою моделювання є визначення характеру зміни швидкості обертання, електромагнітного моменту та струму двигуна під час запуску.

Пуск електродвигуна за допомогою перетворювача частоти дозволяє здійснювати плавне нарощування частоти та напруги живлення, що значно зменшує пускові струми та механічні навантаження на елементи привода і механізму норії.

У процесі моделювання задається закон зміни частоти від нуля до номінального значення. При цьому швидкість обертання ротора поступово зростає до встановленого значення, що відповідає необхідним обертам барабана норії через редуктор з заданим передаточним числом.

На рисунку 3.7 зображена схема що імітує перетворювач частоти.

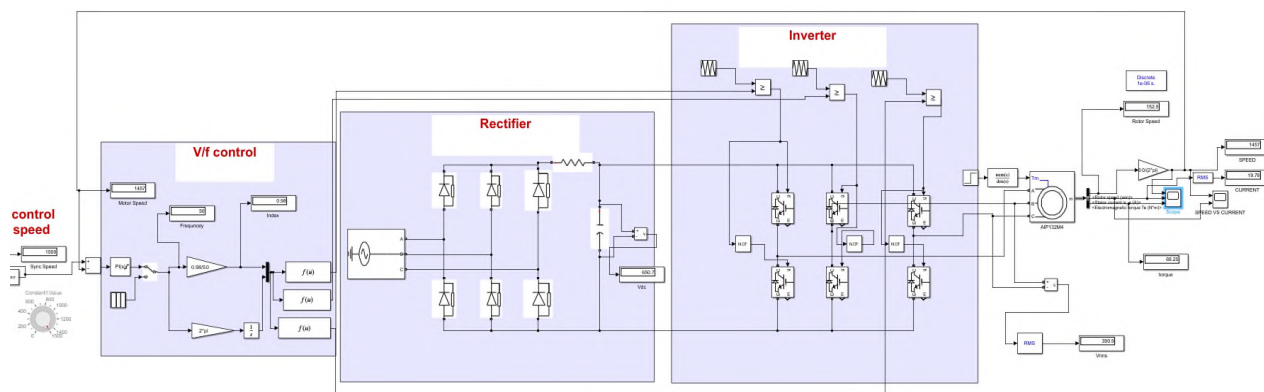


Рисунок 3.7 Модель ПЧ-АД

Розроблена модель являє собою систему частотно-регульованого електропривода норії, побудовану за топологією «Перетворювач частоти — Асинхронний двигун» (ПЧ-АД) з використанням бібліотеки **Simscape Electrical (Specialized Power Systems)**.

3. Система керування (V/f control)

Блок керування реалізує закон скалярного керування $U/f = \text{const}$ із замкненим контуром за швидкістю.

- **Задатчик інтенсивності:** Забезпечує плавне формування сигналу завдання швидкості, що мінімізує динамічні удари в механічних вузлах норії (ковшах та стрічці).
- **ПІ-регулятор швидкості:** Порівнює задане значення з реальним сигналом зворотного зв'язку. Він автоматично коригує вихідну частоту для компенсації ковзання двигуна при зміні навантаження від 0 до **67.8 Нм**.
- **Блок ШІМ-модуляції (PWM Generator):** Генерує високочастотні імпульси керування затворами транзисторів інвертора, перетворюючи розраховані значення напруги у реальні сигнали перемикання.

2. Силова частина (Rectifier & Inverter)

Силовий перетворювач моделює структуру промислового ПЧ (типу Siemens SINAMICS V20):

- **Rectifier (Випрямляч):** Некерований трифазний діодний міст, що перетворює змінну напругу мережі 380 В у постійну.
- **DC-link (Ланка постійного струму):** Містить ємнісний фільтр для згладжування пульсацій. На дисплеї моделі зафіксовано стабільну напругу $V_{dc} \approx 650 \text{ В}$.
- **Inverter (Інвертор):** Трифазний мостовий інвертор на базі **IGBT-транзисторів**. Він здійснює зворотне перетворення постійної напруги у змінну з регульованою частотою та амплітудою для керування швидкістю двигуна.

3. Електромеханічна частина (Motor & Load)

- **Електродвигун:** Використано модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором **АИР132М4** потужністю 11 кВт. Параметри моделі відповідають паспортним даним реального двигуна.
- **Модель навантаження T_M :** Вхід механічного моменту підключений до комбінованого блоку (Step і Transfer fcn), який імітує поступове заповнення ковшів норії зерном до досягнення номінального моменту опору.

Аналіз результатів моделювання

Для перевірки працездатності розробленої системи керування було проведено серію імітаційних експериментів для трьох характерних режимів роботи.

Завдання швидкості здійснювалось через блок «**Control speed**», де встановлювались значення синхронної частоти обертання магнітного поля: **1450, 1200 та 900 об/хв.**

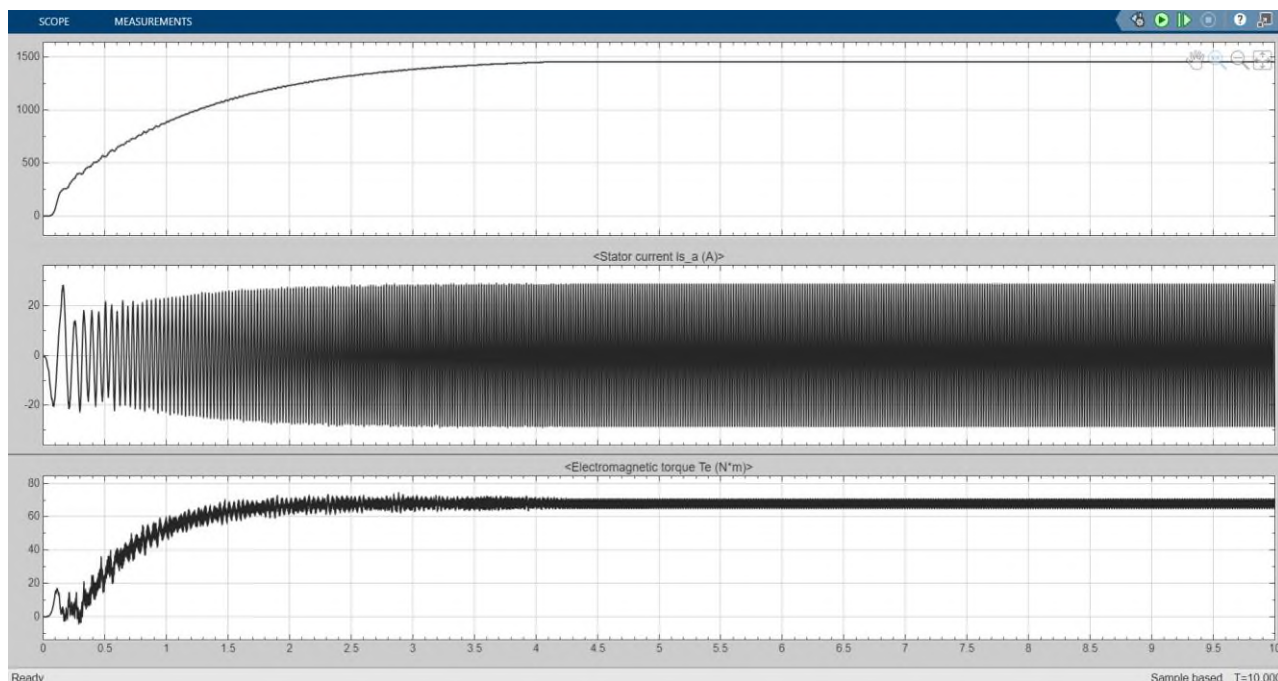


Рисунок 3.8 Характеристики при 1450 об/хв.

Режим номінальної швидкості ($n=1450$ об/хв, $f=50$ Гц)

Осцилограми перехідних процесів для номінального режиму наведені на Рисунок 3.8

Швидкість: Система демонструє плавний, без перерегулювання, вихід на синхронну швидкість. Після прикладання повного моменту опору 67.8 Нм швидкість стабілізується на рівні, близькому до заданого. Відсутність значного просідання швидкості свідчить про ефективну роботу ПІ-регулятора швидкості та достатню жорсткість механічної характеристики. Швидкість зафіксувалась на 1457 об/хв

Струм статора: Пусковий струм обмежений системою ШІМ на рівні близько **25 А** (амплітудне значення), що унеможливорює великі кидки струму, характерні для прямого пуску. В усталеному режимі амплітуда струму стабілізується, що відповідає діючому значенню близько **19.8 А**, що є номінальним для двигуна АІР132М4.

Електромагнітний момент: Момент плавно наростає та утримується на рівні навантаження 67.8 Нм. Високочастотні пульсації є наслідком роботи ШІМ-інвертора і не впливають на стабільність швидкості завдяки інерції механічної частини.

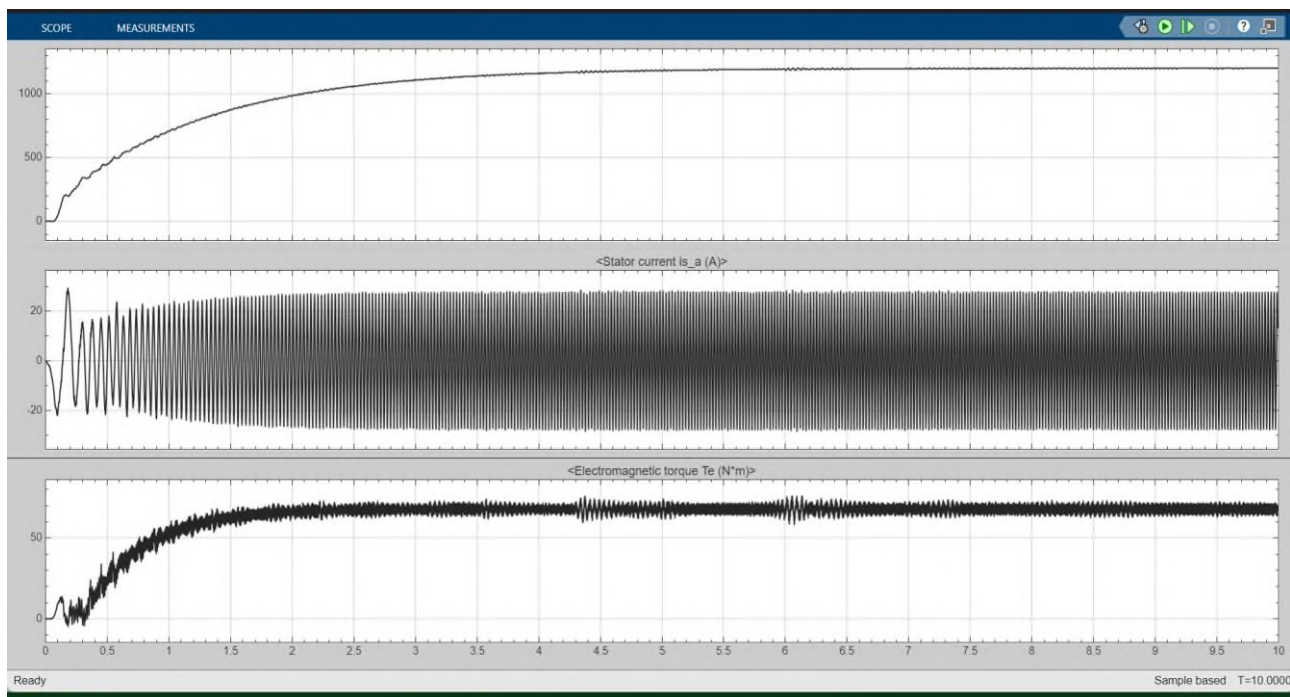


Рисунок 3.9 Характеристики при 1200 обертах

Режим зниженої швидкості ($n=1200$ об/хв, $f=41$ Гц)

Осцилограми для цього режиму наведені на Рисунку 3.9

Швидкість: Поведінка системи аналогічна номінальному режиму: плавний пуск та стійке підтримання швидкості **1200 об/хв**. Це підтверджує раціональність налаштування задатчика інтенсивності для забезпечення м'яких пусків елеваторного обладнання. Для режиму 1200 об/хв зафіксовано незначні коливання швидкості в діапазоні **1195–1200 об/хв**. Це зумовлено динамічною роботою ПІ-регулятора швидкості, який компенсує змінне ковзання при роботі на зниженій частоті.

Струм статора: Амплітуда пускового струму залишається на рівні ~ 25 А. Усталений струм коливається від 16 А до 20 А. Коливання струму в межах 16–20 А — це результат активного відпрацювання ПІ-регулятором статичного моменту навантаження.

Електромагнітний момент: Система впевнено підтримує повний момент опору при зниженій частоті живлення (41 Гц), що доводить ефективність застосованого закону скалярного керування $U/f = \text{const}$.

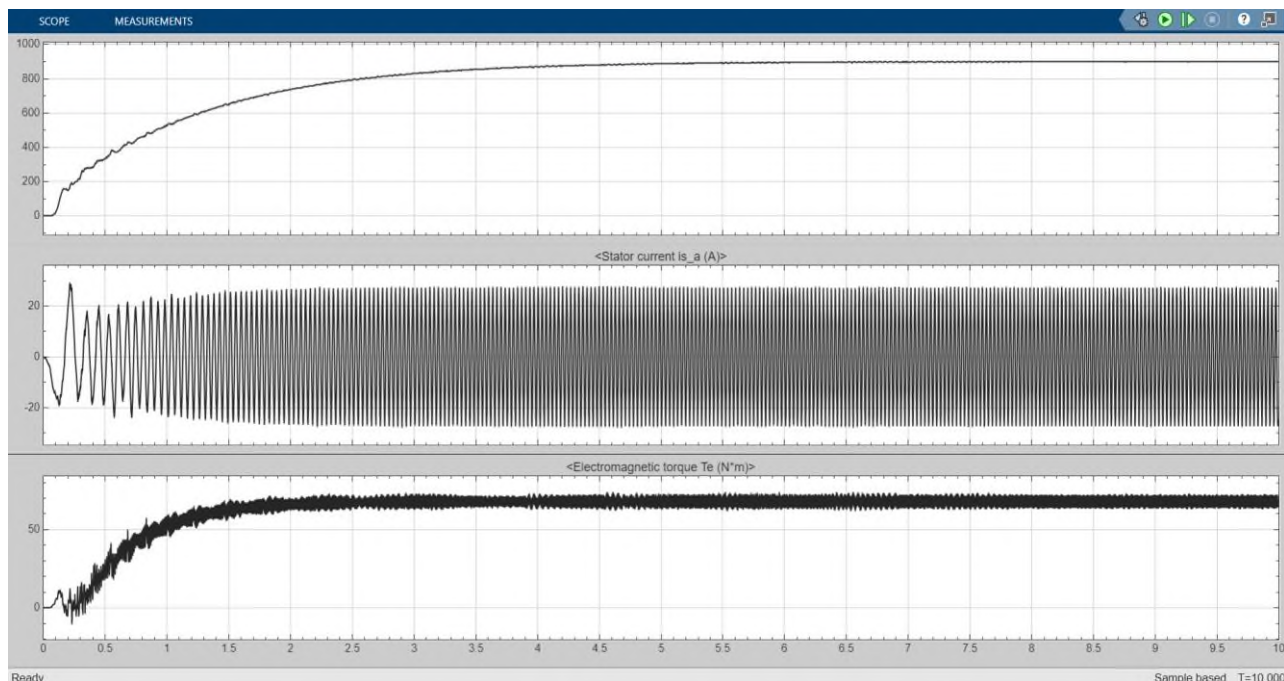


Рисунок 4 Характеристики при 900 оборотах

Третій режим ($n=900$ об/хв, $f=31$ Гц)

Осцилограми глибокого регулювання наведені на Рисунок 4

Швидкість: Даний режим є найбільш важким для системи керування, оскільки при зниженні частоти магнітного поля двигуну складніше створювати необхідний момент. Незважаючи на це, ПІ-регулятор забезпечує стійкий пуск та підтримання швидкості на рівні **900 об/хв**. При регулюванні 900 об/хв система продемонструвала високу стабільність із амплітудою коливань до **3 об/хв (0.33%)**.

Струм статора: Для підтримання моменту 67.8 Нм при низькій частоті живлення струм коливається від 11 А до 18 А.

Електромагнітний момент: Графік показує стійке утримання навантаження. Зростання пульсацій моменту є типовим явищем при роботі ШІМ на низьких частотах, але загалом система залишається керованою та працездатною.

3.5 Висновок по моделювання електроприводу

На основі проведеного імітаційного моделювання та порівняльного аналізу прямого пуску від мережі та пуску за допомогою перетворювача частоти (ПЧ), встановлено наступні переваги використання частотно-регульованого привода:

1. **Мінімізація пускових струмів:** Використання ПЧ дозволило знизити амплітуду пускового струму з ~ 200 А (при прямому пуску) до ~ 25 А. Це усуває небезпечні термічні перевантаження обмоток двигуна та просадки напруги в локальній мережі елеватора, що особливо важливо при роботі від малопотужних підстанцій.
2. **Покращення динамічних характеристик швидкості:** На відміну від прямого пуску, що супроводжується різким прискоренням та значним перерегулюванням, ПЧ забезпечує плавне наростання швидкості за заданим законом. Це гарантує стабільний вихід на робочі оберти (1457, 1200, 900 об/хв) без ризику проковзування стрічки норії на барабані.
3. **Зменшення механічного зносу:** Впровадження частотного керування дозволило повністю усунути ударні моменти. Якщо при прямому пуску ударний момент сягає ~ 166 Нм, то з ПЧ він плавно зростає до номінального значення 67.8 Нм. Це значно подовжує термін служби стрічки, ковшів та підшипникових вузлів, знижуючи витрати на технічне обслуговування.
4. **Висока статична точність:** Застосована система керування з ПП-регулятором забезпечує стабільність обертів із похибкою не більше 0.5% у всьому діапазоні регулювання. Незначні коливання швидкості на низьких частотах (31-41 Гц) є допустимими та підтверджують активну роботу системи автоматичного регулювання для компенсації ковзання під навантаженням.

Позитивні моменти пуску з ПЧ

- **Енергозбереження:** Відсутність пікових навантажень на мережу.

- **Механічний захист:** Відсутність ривків та обривів стрічки/ланцюга норії.
- **Технологічність:** Можливість регулювання продуктивності норії (залежно від вологості чи типу зерна) без зупинки процесу.
- **Надійність:** Можливість "м'якого" довантаження зерна після виходу двигуна на робочу швидкість.

Розділ 4 Організаційно-технологічний розділ

Впровадження системи частотного регулювання на базі перетворювача Siemens SINAMICS V20 для привода норії потребує чіткої організації монтажних робіт та дотримання технологічного регламенту експлуатації. Метою даного розділу є розробка заходів щодо практичної реалізації розробленої системи та забезпечення її надійної роботи в умовах елеватора

4.1. Розробка технології монтажу електропривода норії.

Монтаж електропривода після модернізації включає встановлення асинхронного двигуна типу AIP132M4, а також монтаж силової шафи з перетворювачем частоти Siemens V20.

Основні етапи монтажу:

1. Підготовка фундаменту та монтаж двигуна

Виконується встановлення двигуна на раму норії з подальшою перевіркою співвісності валів двигуна і редуктора.

Співвісність забезпечується за допомогою індикаторів або каліброваних щупів. Відхилення не повинно перевищувати допустимих значень, оскільки це призводить до:

- підвищеної вібрації;
- зносу підшипників;
- перевантаження електродвигуна.

Кріплення двигуна виконується з використанням болтових з'єднань із подальшою перевіркою надійності фіксації.

2. Монтаж шафи керування

Перетворювач частоти Siemens V20 встановлюється у пилозахищену шафу з класом захисту не нижче IP54.

Це обумовлено тим, що:

- зерновий пил є вибухонебезпечним;
- пил погіршує тепловідведення та може призвести до перегріву ПЧ.

У шафі необхідно передбачити:

- вентиляцію або примусове охолодження;
- достатній простір для циркуляції повітря;
- дотримання монтажних зазорів згідно з рекомендаціями виробника.

3. Електромонтажні роботи

Підключення виконується відповідно до електричної схеми та включає:

- підключення трифазного живлення 380 В через автоматичний вимикач;
- встановлення захисту (автомат +, за потреби, теплове реле або захист у ПЧ);
- підключення двигуна до ПЧ.

Для з'єднання ПЧ з двигуном використовується **екранований кабель**, що дозволяє:

- зменшити електромагнітні завади (ЕМП);
- підвищити стабільність роботи ПЧ та суміжного обладнання.

Екран кабелю необхідно заземлювати з обох сторін (або за схемою виробника).

4. Організація заземлення

Обов'язково виконується монтаж захисного заземлення, яке забезпечує:

- електробезпеку персоналу;
- коректну роботу силової та керуючої електроніки ПЧ;
- зменшення впливу перешкод.

Опір заземлювального контуру повинен відповідати вимогам нормативних документів.

4.2. Організація системи технічного обслуговування та поточного ремонту.

Надійна робота електропривода норії значною мірою залежить не тільки від якості монтажу, а й від правильно організованої системи технічного обслуговування. Для даного електропривода доцільно застосовувати планово-попереджувальну систему обслуговування, яка передбачає регулярний контроль технічного стану обладнання та своєчасне усунення можливих несправностей.

У процесі експлуатації обслуговування поділяється на щоденне, періодичне та планове. Щоденне обслуговування виконується обслуговуючим персоналом перед запуском та під час роботи норії. Воно включає візуальний огляд електродвигуна, перевірку відсутності сторонніх шумів, вібрацій та перегріву, а також контроль параметрів, що відображаються на панелі перетворювача частоти. Особливу увагу слід приділяти стабільності струму та відсутності аварійних повідомлень.

Періодичне обслуговування проводиться через встановлені інтервали часу (зазвичай раз на 1–3 місяці) і передбачає більш детальну перевірку обладнання. На цьому етапі виконується очищення внутрішнього простору шафи керування від пилу, що є критично важливим для умов елеватора. Також перевіряється стан контактних з'єднань, кабельних ліній та ізоляції, оцінюється ефективність роботи системи вентиляції.

Планове технічне обслуговування здійснюється один-два рази на рік і включає комплексну діагностику. Зокрема, перевіряється стан підшипників електродвигуна, виконується підтяжка кріпильних елементів, вимірюється опір ізоляції обмоток та контролюється стан заземлювального контуру. Крім того, проводиться аналіз роботи перетворювача частоти за журналом подій та аварій.

Поточний ремонт електропривода передбачає усунення несправностей, які виникають у процесі експлуатації. До таких робіт належить заміна підшипників двигуна, ремонт або заміна кабельних з'єднань, обслуговування

системи охолодження перетворювача частоти, а також заміна окремих електронних компонентів у разі їх виходу з ладу.

Таким чином, правильно організована система технічного обслуговування дозволяє суттєво підвищити надійність роботи електропривода норії, зменшити кількість аварійних зупинок та продовжити термін служби обладнання.

4.3. Технологічний регламент експлуатації та налаштування перетворювача частоти.

Ефективна робота електропривода норії з використанням перетворювача частоти значною мірою визначається правильністю його налаштування та дотриманням режимів експлуатації. Налаштування перетворювача виконується на основі паспортних даних електродвигуна та вимог технологічного процесу.

На початковому етапі в пам'ять перетворювача вводяться основні номінальні параметри двигуна: потужність, напруга живлення, номінальний струм, частота та швидкість обертання. Це необхідно для коректної роботи алгоритмів керування та захисту.

Для привода норії доцільно застосовувати скалярний закон керування типу V/f , який забезпечує достатню стабільність роботи при відносно простій реалізації. Векторне керування у даному випадку не є обов'язковим, оскільки не потребується висока точність регулювання моменту.

Особливу увагу слід приділити налаштуванню часу розгону та гальмування. Надто швидкий пуск може призвести до перевантаження двигуна і збільшення пускових струмів, тоді як надто повільний — знижує продуктивність. Практично доцільно встановлювати час розгону в межах 5–15 секунд, а час гальмування — 5–20 секунд.

У процесі експлуатації необхідно також обмежити максимальний струм на рівні 1,1–1,2 від номінального значення, що дозволяє уникнути перевантаження двигуна. Мінімальна робоча частота зазвичай

встановлюється на рівні 10–15 Гц, оскільки при нижчих значеннях значно погіршується ефективність охолодження двигуна.

Важливим елементом є налаштування системи захистів перетворювача частоти. Обов'язково повинні бути активовані захисти від перевантаження, короткого замикання, перенапруги та перегріву. Це дозволяє запобігти пошкодженню як самого перетворювача, так і електродвигуна.

Дотримання технологічного регламенту експлуатації забезпечує стабільну роботу електропривода, підвищує його енергоефективність та знижує ризик виникнення аварійних ситуацій.

4.4. Забезпечення безпечної експлуатації та заходи з охорони праці.

Експлуатація електропривода норії пов'язана з низкою потенційно небезпечних факторів, серед яких основними є електричний струм, рухомі механічні частини та вибухонебезпечний пил. Тому забезпечення безпечних умов праці є обов'язковою складовою впровадження системи частотного регулювання.

Електробезпека досягається шляхом дотримання правил експлуатації електроустановок. Усі роботи з обслуговування та ремонту повинні виконуватися тільки після повного зняття напруги та перевірки її відсутності.

Персонал зобов'язаний використовувати засоби індивідуального захисту, зокрема діелектричні рукавички та інструмент із ізольованими ручками.

Обов'язковою умовою є наявність справного захисного заземлення.

Особливу небезпеку в умовах елеватора становить зерновий пил, який може утворювати вибухонебезпечні суміші. У зв'язку з цим необхідно регулярно очищати обладнання та приміщення від пилу, забезпечувати належну вентиляцію та використовувати шафи керування з відповідним ступенем захисту.

Під час роботи з перетворювачем частоти необхідно враховувати наявність накопиченої енергії в конденсаторах. Навіть після вимкнення живлення на

силових клемах може залишатися небезпечна напруга, тому перед проведенням робіт слід витримувати паузу не менше 5–10 хвилин. Для запобігання травматизму всі рухомі частини норії повинні бути огорожені, а доступ до них — обмежений. Обслуговуючий персонал повинен проходити регулярний інструктаж з техніки безпеки та мати відповідну кваліфікацію.

Таким чином, дотримання вимог охорони праці та техніки безпеки дозволяє мінімізувати ризики для персоналу та забезпечити безпечну експлуатацію електропривода норії в умовах підвищеної запиленості.

Розділ 5 Економічне обґрунтування та ефективність проєкту

У даному розділі виконано економічне обґрунтування модернізації електропривода норії. Оцінка ефективності базується на визначенні капітальних витрат на впровадження нового обладнання, аналізі експлуатаційних витрат та розрахунку економії електроенергії при різних режимах роботи.

Особливу увагу приділено впливу частотного регулювання на енергоспоживання та механічний стан привода. Враховано як зниження витрат електроенергії при роботі на знижених швидкостях, так і зменшення витрат на ремонт і обслуговування внаслідок зниження динамічних навантажень.

На основі отриманих результатів визначено річний економічний ефект та розраховано термін окупності впровадження частотно-регульованого електропривода.

5.1. Розрахунок капітальних витрат на модернізацію електропривода.

Капітальні витрати на модернізацію електропривода норії визначаються як сума витрат на придбання основного обладнання та витрат на монтаж, налаштування і пусконаладжувальні роботи.

					КРБ.АТЕРС.1.641-03.1.2	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		56

Розрахунок виконується за формулою:

$$K = C_{\text{обл}} + C_{\text{дод}} \quad (27)$$

де:

$C_{\text{обл}}$ — вартість основного обладнання, грн;

$C_{\text{дод}}$ — додаткові витрати (монтаж, налаштування, пусконаладжувальні роботи), грн.

Склад та вартість основного обладнання

До складу основного обладнання входять електродвигун, частотний перетворювач, редуктор, а також елементи силового та керуючого кола.

Вартість обладнання наведена у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 Вартість обладнання

Найменування обладнання	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
Електродвигун АИР132М4 (11 кВт)	1	15 500	15 500
Частотний перетворювач Siemens SINAMICS V20 (15 кВт)	1	49 492	49 492
Редуктор 1Ц2У-200	1	17 500	17 500
Кабель ВВГнг-LS 4×4 мм ² (50 м)	1	5 250	5 250
Автоматичний вимикач Schneider iC60N C32 3P	1	1 350	1 350
Контактор Schneider LC1D32	1	4 200	4 200
Реле контролю фаз Schneider RM22TG20	1	2 550	2 550

Загальна вартість основного обладнання:

$$C_{\text{обл}} = 95\,842 \text{ грн} \quad (28)$$

Додаткові витрати

До додаткових витрат належать витрати на виготовлення шафи керування, монтаж обладнання, налаштування частотного перетворювача та пусконаладжувальні роботи.

$$C_{\text{дод}} = 18\,000 \text{ грн} \quad (29)$$

Загальні капітальні витрати

$$K=93\,842+18\,000=113\,842 \text{ грн} \quad (30)$$

З урахуванням округлення:

$$K \approx 114\,000 \text{ грн}$$

Отримані капітальні витрати на модернізацію електропривода норії становлять 112 000 грн, що є базою для подальшого розрахунку економічної ефективності та терміну окупності проекту.

5.2. Аналіз експлуатаційних витрат та економії електроенергії.

Експлуатаційні витрати визначаються головним чином енергоспоживанням електропривода норії. Використання частотного перетворювача Siemens SINAMICS V20 дозволяє:

- обмежити пусковий струм $\approx 25 \text{ А}$ (замість $\approx 200 \text{ А}$ при прямому пуску);
- забезпечити плавний розгін і регулювання швидкості обертання;
- зменшити витрати електроенергії при роботі на знижених швидкостях.

Енергоспоживання при різних режимах роботи

На основі проведених вимірювань при навантаженні 67,8 Н·м:

Таблиця 5.2 Енергоспоживання

Швидкість об/хв	Потужність, кВт	Середній струм, А	Діапазон струму, А
1457	10,3	19,8	—
1200	9,4	18	16–20
900	7,55	14,5	11–18

Тариф на електроенергію для юридичних осіб 2 класу напруги в Одеській області станом на березень 2026 р.: **15,02 грн/кВт·год.**

Річні витрати на електроенергію при 5000 год/рік

$$E = P \cdot T$$

де:

- P — споживана потужність, кВт;
- T — час роботи, год.

Таблиця 5.3 Річні витрати при 5000 год/рік

Режим об/хв	Енергоспоживання, кВт·год	Вартість, грн	Економія, грн
1457	51 500	773 530	—
1200	47 000	705 940	67 590
900	37 750	567 005	206 525

Річні витрати на електроенергію при 6000 год/рік

Таблиця 5.4 Річні витрати при 6000 год/рік

Режим об/хв	Енергоспоживання, кВт·год	Вартість, грн	Економія, грн
1457	61 800	928 236	—
1200	56 400	847 128	81 108
900	45 300	680 406	247 830

Найбільша економія досягається при роботі на **900 об/хв**, що дозволяє знизити витрати на електроенергію до **27%** порівняно з номінальною швидкістю.

Використання частотного регулювання дозволяє:

- скоротити річні витрати на електроенергію на 67–248 тис. грн залежно від режиму;
- значно зменшити пускові струми та динамічне навантаження на механічні елементи;
- підвищити ефективність роботи обладнання та гнучкість регулювання продуктивності норії.

5.3. Розрахунок річного економічного ефекту від зменшення механічного зносу.

Прямий пуск електродвигуна створює ударний момент до **166 Н·м**, що значно прискорює знос стрічки норії, підшипників та редуктора. Частотний перетворювач Siemens SINAMICS V20 забезпечує плавний розгін,

обмежуючи момент і зменшуючи динамічні навантаження у **5–7 разів**, що істотно підвищує ресурс механічних елементів.

Оцінка економії

1. Зменшення витрат на ремонт редуктора та підшипників

На основі норм витрат та частоти ремонту, річна економія складає:

$$E_{\text{рем}} = 9\,000 \div 13\,000 \text{ грн/рік} \quad (31)$$

2. Збільшення терміну служби стрічки норії

Підвищення ресурсу на **35–50%** дозволяє економити:

$$E_{\text{стрічка}} = 7\,000 \div 11\,000 \text{ грн/рік} \quad (32)$$

Загальний річний економічний ефект

$$E_{\text{знос}} = E_{\text{рем}} + E_{\text{стрічка}} = 16\,000 \div 24\,000 \text{ грн/рік} \quad (33)$$

Для подальших розрахунків терміну окупності прийнято середнє значення економії: **20 000 грн/рік**.

Впровадження частотного регулювання дозволяє:

- зменшити механічний знос обладнання;
- скоротити витрати на ремонт та обслуговування;
- підвищити надійність роботи норії та ресурс її основних елементів.

Цей ефект додається до економії електроенергії і враховується при розрахунку терміну окупності проекту.

5.4. Визначення терміну окупності системи автоматизації.

Термін окупності визначається як відношення **капітальних витрат на модернізацію до річного економічного ефекту**, який включає економію електроенергії та економію від зменшення механічного зносу:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{K}{E_{\text{річн}}}$$

де:

- $K = 114\,000 \text{ грн}$ — загальні капітальні витрати;
- $E_{\text{річн}}$ — річний економічний ефект, грн/рік.

Розрахунок для різних режимів роботи при 5000 год/рік

					КРБ.АТЕРС.1.641-03.1.2	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		60

Таблиця 5.5 Терміни окупності

Режим об/хв	Економія електроенергії, грн	Економія від зносу, грн	Загальний ефект, грн	Термін окупності, роки
1457	0	20 000	20 000	5,7
1200	67 590	20 000	87 590	1,3
900	206 525	20 000	226 525	0,50

Найшвидша окупність досягається при роботі на **900 об/хв** - ≈ 6 місяців.

Комбінований режим роботи

Якщо використовувати норію в комбінованому режимі (50% часу на 1457 об/хв і 50% на 900–1200 об/хв), середній термін окупності:

$$E_2 = \frac{87590 + 226525}{2} = 113306.3 \text{ грн} \quad (34)$$

$$E_{\text{річн}} = 0.5 \cdot 20\,000 + 0.5 \cdot 147\,057.5 = 66653.15 \quad (35)$$

Термін окупності:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{114000}{83\,529} = 1.7 \text{ року} \quad (36)$$

Термін окупності становить 1 рік 9 місяців.

Висновок

Модернізація електропривода норії із застосуванням асинхронного двигуна АИР132М4 та частотного перетворювача Siemens SINAMICS V20 показала високу економічну ефективність. Загальні капітальні витрати на впровадження складають 114 000 грн, що повністю окупається завдяки економії електроенергії та зменшенню механічного зносу обладнання. Найбільша економія досягається при роботі на знижених швидкостях: 900 об/хв дозволяє скоротити витрати на електроенергію до 27 % і забезпечує термін окупності всього 6 місяців. При комбінованому режимі експлуатації середній термін окупності складає 1,7 року.

Впровадження частотно-регульованого електропривода не лише зменшує енергоспоживання та механічний знос, але й дозволяє гнучко регулювати

продуктивність норії відповідно до реальних умов роботи, що робить проект сучасним і економічно обґрунтованим.

Висновки і пропозиції

У результаті виконання роботи було проведено комплексний аналіз роботи ковшового підйомника (норії) та обґрунтовано доцільність модернізації його електропривода на основі частотного регулювання.

1. Визначено основні параметри роботи механізму, зокрема необхідне тягове зусилля та потужність. Для реалізації привода обрано асинхронний електродвигун типу АІР132М4 (11 кВт), який за своїми характеристиками забезпечує сталий пуск та стабільну роботу в номінальному режимі.
2. Для керування двигуном обрано перетворювач частоти Siemens SINAMICS V20. Його впровадження дозволяє реалізувати плавний пуск (що усуває пускові струми кратністю 7,5), нівелювати динамічні удари в кінематичній схемі та забезпечити гнучке регулювання швидкості стрічки залежно від потоку матеріалу.
3. Економічний аналіз підтвердив високу ефективність проекту. При капітальних витратах у розмірі 114 000 грн та комбінованому режимі експлуатації (50% часу — номінал 1457 об/хв, 50% — знижені оберти 900–1200 об/хв), строк окупації становить 1,7 року (близько 1 року та 9 місяців). Найвищий енергозберігаючий ефект досягається саме при роботі на знижених частотах, де споживання енергії суттєво зменшується відповідно до механічних характеристик навантаження.

ПРОПОЗИЦІЇ

- Впровадити частотно-регульований привід на базі обраного обладнання для зниження питомих витрат електроенергії та покращення експлуатаційних показників норії.

- Використовувати режими зниженої швидкості (900–1200 об/хв) у періоди неповного завантаження підйомника, що дозволяє оптимізувати енергоспоживання без втрати технологічної ефективності.
- Налаштувати вбудовані функції захисту ПЧ для моніторингу стану двигуна AIP132M4, що дозволить подовжити міжремонтний ресурс механічної частини та запобігти аварійним зупинкам лінії.
- У подальшому доцільно інтегрувати перетворювач частоти в загальну систему автоматизації підприємства для реалізації автоматичного керування швидкістю за зворотним зв'язком від датчиків завантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузьмін О.В. Електричні машини. — Київ: Вища школа, 2011. — 399 с.
2. Бойко В.С., Данько В.Г. Електропривод виробничих механізмів. — Київ: Каравела, 2013. — 312 с.
3. Лещенко О.П. Автоматизований електропривод. — Київ: НУХТ, 2015. — 256 с.
4. Сегеда М.С. Електричні машини та трансформатори. — Львів: Львівська політехніка, 2012. — 420 с.
5. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). — Київ: Мінпаливенерго України, чинна редакція.
6. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Загальні вимоги.
7. ДСТУ ІЕС 60034-1:2017. Машини електричні обертові. Номінальні дані та характеристики.
8. ДСТУ 2244-93. Електродвигуни асинхронні. Загальні технічні умови.
9. Mathematical modeling of an induction motor for vehicles / S. Gulak, O. Hubarevych, E. Yermolenko et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 2, No. 2 (104). – P. 25–34. – DOI: 10.15587/1729-4061.2020.199559.
10. Технічна документація на редуктори типу 1Ц2У. — Загальні технічні характеристики і параметри. <https://xn--80aqy.com.ua/uk/reduktory/ts2u-200-i-1ts2u-200/>