

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ ТА МЕХАТРОНІКИ



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи бакалавра на тему:

«Модернізація електроприводу вантажного підйомника»

Здобувач: Федосєєв А.С.

IV курсу, групи АЕМ-40

Керівник: к.ф-м.н., доцент

Ревенюк Т.А.

Кваліфікаційна робота бакалавра допускається до захисту.

Рішення кафедри від «16» червня 2026 р., протокол № 8.

Завідувач кафедри АТЕіРС _____ Олексій ЖИГАЙЛО

ОДЕСА 2026

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут: Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніка та комп'ютерного програмування ім. П. М. Платонова

Кафедра: Електромеханіки та мехатроніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Галузь знань: 14 – Електрична інженерія

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри ЕтаМ

д.т.н., доц. Осадчук П.І.

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

здобувачу вищої освіти

Федосєєву Артему Сергійовичу

Тема роботи: «Модернізація електроприводу вантажного підйомника».

Керівник роботи: Ревенюк Т.А., к.ф.-м.н., доцент.

2 Затверджено наказом ОНТУ № 641-03 від 21.11.2025 р.

Строк подання студентом роботи: 15.06.2026 р.

3 Вихідні дані до роботи: Вантажопідйомність підйомника-2500 кг, маса рухомих частин -200 кг, швидкість підйому вантажу 0,50 м/с.

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

Вступ. 1. Загальна характеристика роботи. Актуальність теми. Об'єкт і мета роботи.

2 Розрахунково-конструкторська частина. Опис технологічної схеми. Загальна характеристика вантажного підйомника, як об'єкта управління. Опис принципу дії, конструкції та кінематичної схеми привода вантажного підйомника. Формулювання вимог до електроприводу вантажного підйомника, обґрунтування типу двигуна, розрахунок його потужності. Розрахунок статичних характеристик двигуна.

3 Дослідження роботи електроприводу вантажного підйомника на моделі. Обґрунтування вибору, розробка структурних і функціональних схем та розрахунок параметрів окремих елементів системи електроприводу. Опис системи ПЧ-АД. Моделювання динамічних режимів електромеханічної системи електроприводу до і після модернізації.

4. Організація та технологія монтажу, ремонту і обслуговування та техніка безпеки праці при обслуговуванні електроприводу вантажного підйомника

5 Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.

6. Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями.

Список використаних джерел. Додатки.

5 Перелік демонстраційного матеріалу: слайди презентації (10 шт.): 1 Титульний. 2 Мета, задачі, методи. 3 Види вантажних підйомників. 4 Розрахунок потужності двигуна, технічні характеристики. 5 Структурна схема перетворювача частоти. 7 Принципова електрична схема силової частини. 8 Результати моделювання приводу з прямим пуском. 9. Результати моделювання приводу після модернізації. 10 Висновки.

6 Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7 Дата видачі завдання: 05.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів	Прим.
1	Вступ. Загальна характеристика роботи. Актуальність теми. Об'єкт і мета роботи.	05.03.2026	
2	Розрахунково-конструкторська частина. Опис технологічної схеми вантажного підйомника. Загальна характеристика вантажного підйомника, як об'єкта управління. Опис принципу дії, конструкції та кінематичної схеми привода вантажного підйомника. Параметрична схема та методи регулювання швидкості обертання електроприводу вантажного підйомника. Формулювання вимог до електроприводу вантажного підйомника, обґрунтування типу двигуна, розрахунок його потужності. Розрахунок статичних характеристик двигуна.	30.04.2026	
3	Дослідження роботи електроприводу на моделі. Обґрунтування вибору, розробка структурних і функціональних схем та розрахунок параметрів окремих елементів системи електроприводу вантажного підйомника. Опис системи ПЧ-АД. Моделювання динамічних режимів електромеханічної системи електроприводу до і після модернізації.	25.05.2026	
4	Організація та технологія монтажу, ремонту і обслуговування та техніка безпеки праці при обслуговуванні електроприводу вантажного підйомника.	03.06.2026	
5	Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.	10.06.2026	
6	Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями.		
7	Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра	15.06.2026	
8	Перевірка роботи на доброчесність. Рецензування роботи	18.06.2026	
9	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	22.06.2026	

Здобувач-дипломник _____ Федосєєв А.С.

Керівник _____ Ревенюк Т.А.

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 _____ Федосєєв А.С.

РЕФЕРАТ

Федосєєв Артем Сергійович. «Модернізація електроприводу вантажного підйомника». Кваліфікаційна робота бакалавра. Одеса: ОНТУ, 2026. – 86 с. Іл.: 7. Табл.: 8.

У кваліфікаційній роботі описано автоматизований електропривод вантажного підйомника, області його застосування та конструктивні особливості. Сформульовано вимоги до електроприводу, розраховано навантаження та обрано двигун для приводу вантажного підйомника

Вибрано систему електроприводу «перетворювач частоти - асинхронний двигун», обрано та досліджено закон керування за допомогою перетворювача частоти.

Розраховано електричні параметри схеми вмикання двигуна. Змодельовано перехідні процеси двигуна при прямому пуску та в комбінації з перетворювачем частоти, побудовано механічні та електромеханічні статичні характеристики.

Розраховано економічний ефект від модернізації електроприводу вантажного підйомника та наведено заходи з охорони праці та техніки безпеки.

Ключові слова: вантажний підйомник, автоматизований електропривод, перетворювач частоти, математична модель, частотне регулювання обертів, механічна характеристика.

ABSTRACT

Fedosieiev Artem Serhiyovych. "Modernization of the electric drive of a freight hoist". Bachelor's qualification work. Odesa: ONTU, 2026. – 86 p. Ills.: 7. Tables: 8.

The qualification work describes an automated electric drive of a freight hoist, its application areas, and design features. The requirements for the electric drive are formulated, the loads are calculated, and a motor for the freight hoist drive is selected.

A "frequency inverter - induction motor" electric drive system has been chosen; the control strategy using the frequency inverter has been selected and investigated.

The electrical parameters of the motor connection circuit are calculated. The transients of the motor during direct-on-line (DOL) start and in combination with a frequency inverter are simulated, and mechanical and electromechanical static characteristics are plotted.

The economic effect of modernizing the freight hoist electric drive is calculated, and occupational health and safety measures are provided.

Keywords: freight hoist, automated electric drive, frequency inverter, mathematical model, variable frequency speed control, mechanical characteristic.

ЗМІСТ

1 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПІДЙОМНИКИ ТА СИСТЕМИ ЇХНЬОГО ПРИВОДУ	8
1.1 Класифікація та конструктивні різновиди вантажних підйомників.	8
1.2 Конструкція та принцип дії електромеханічних підйомників.	9
1.3 Вантажний підйомник шахтного типу.	11
1.4 Типи електродвигунів у вантажопідйомних механізмах.	13
1.5 Режимы пуску асинхронного двигуна з КЗ ротором у підйомниках.	15
1.6 Вибір електродвигуна та способу пуску для конкретного підйомника.	19
2 РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА СЕРІЇ АІР ДЛЯ ПРИВОДУ ВАНТАЖНОГО ПІДЙОМНИКА	21
2.1 Технічні умови для розрахунку.	21
2.2 Розрахунок необхідної потужності.	22
2.3 Перевірка двигуна АІР 160 S4 за умовами роботи.	23
2.4 Параметри схеми заміщення.	27
2.5 Перетворювач частоти як засіб керування асинхронним двигуном.	29
2.6 Принцип дії та структурні складові перетворювача частоти.	30
2.7 Алгоритми керування перетворювача частоти.	33
2.8 Обґрунтування застосування ПЧ з АД КЗ у вантажному підйомнику.	35
2.9 Вибір перетворювача частоти для електродвигуна АІР160S4.	37
2.10 Технічні характеристики обраного ПЧ та схема підключення.	38
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НА БАЗІ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ	44
3.1 Фізичні припущення та вихідні рівняння.	44
3.2 Перетворення Парка–Горєва: фізична сутність і математичне формулювання.	47
3.3 Рівняння АД КЗ у довільній системі координат dq.	50

					КРБ.АТЕіРС.141.641-03.9				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив		Федосєєв А. С.			Модернізація електроприводу вантажного підйомника				
Керівник		Ревенюк Т. А.							
Зав.кафедри.		Жигайло О. М.							
					Літ.	Аркуш	Аркушів		
							6		
					ОНТУ, АЕМ-40				

3.4 Числова реалізація моделі.	51
3.5 Аналіз пускових характеристик на основі математичної моделі.	56
4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВАНТАЖНОГО ПІДЙОМНИКА ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА.	57
4.1 Аналіз базового варіанта електроприводу.	57
4.2 Аналіз проектного варіанта – впровадження частотного перетворювача.	61
4.3 Визначення капітальних витрат на модернізацію.	65
4.4 Розрахунок терміну окупності та показників ефективності.	67
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ МОНТАЖІ І ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ПІДЙОМНИКІВ.	69
5.1 Нормативно-правова база у сфері безпеки вантажопідйомних механізмів.	69
5.2 Організаційні заходи безпеки та управління охороною праці.	71
5.3 Технічні вимоги безпеки до конструкції підйомників.	73
5.4 Вимоги безпеки при монтажі вантажних підйомників.	75
5.5 Технічний огляд та порядок введення в експлуатацію.	77
5.6 Вимоги безпеки при експлуатації вантажних підйомників.	79
5.7 Електробезпека при обслуговуванні підйомників.	80
5.8 Пожежна безпека при монтажі та експлуатації підйомників.	81
5.9 Санітарно-гігієнічні вимоги та умови праці операторів підйомників.	81
ВИСНОВКИ.	83
Перелік використаних джерел.	84

					КРБ.АТЕіРС.141.641-03.9					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Модернізація електроприводу вантажного підйомника			Літ.	Аркуш	Аркушів
Розробив		Федосеев А. С.								
Керівник		Ревенюк Т. А.								7
								ОНТУ, АЕМ-40		
Зав.кафедри.		Жигайло О. М.								

1 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПІДЙОМНИКИ ТА СИСТЕМИ ЇХНЬОГО ПРИВОДУ

1.1 Класифікація та конструктивні різновиди вантажних підйомників.

Сучасне промислове виробництво, будівництво та складська логістика неможливі без ефективних засобів вертикального транспортування вантажів. Серед усього різноманіття вантажопідйомного обладнання електромеханічні підйомники посідають особливе місце у результаті поєднанню надійності, універсальності та можливості точного автоматичного керування. У цьому розділі розглядаються конструктивні різновиди електромеханічних підйомників, принципи дії їхніх електропривідних систем, а також характеристики основних типів електродвигунів, що застосовуються у вантажопідйомних механізмах.

Вантажні підйомники класифікують за принципом дії силового органу, конструкцією несучих елементів, способом монтажу та умовами експлуатації. Найбільш узагальнена класифікація передбачає поділ на п'ять основних груп: гідравлічні, електромеханічні, пневматичні, ножичні та ланцюгові (поліспасти).

Гідравлічні підйомники діють за законом Паскаля: рідина, що нагнітається насосом під тиском, передає зусилля на поршень силового циліндра, який і здійснює вертикальне переміщення вантажу. Ці установки вирізняються великою питомою вантажопідйомністю та плавністю ходу, однак потребують розгалуженої гідравлічної мережі, ретельного обслуговування ущільнень і чутливі до температури навколишнього середовища.

Пневматичні підйомники застосовують стиснене повітря і застосовуються переважно на підприємствах, де вже наявна пневмомережа. Їхня основна перевага – висока швидкість спрацювання та пожежна безпека; основний недолік – порівняно невелика вантажопідйомність і залежність від стабільності тиску в мережі.

Ножичні підйомники засновані на кінематиці шарнірно-важільного механізму у формі ромба. Привід – гідравлічний або електромеханічний – розводить або зводить

бокові ланки ромба, внаслідок чого платформа переміщується строго вертикально. Таку конструкцію широко застосовують у складській техніці та при проведенні висотних монтажних робіт. На рисунку 1.1 наведено загальний вигляд ножичного підйомника із гідравлічним приводом.

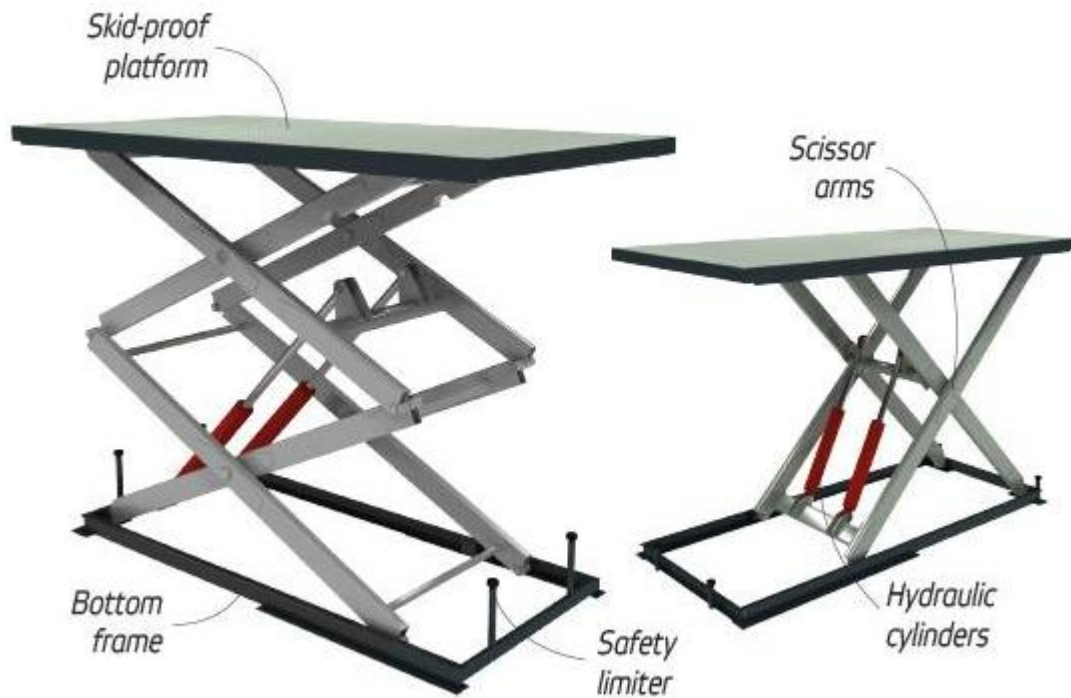


Рис. 1.1 – Ножичний підйомник із гідравлічним приводом.

Ланцюгові підйомники (талі) реалізують принцип поліспаду: система нерухомих і рухомих блоків з ланцюговим або канатним тяговим органом забезпечує можливість виграти в силі за рахунок збільшення шляху. Електричні талі з підвіскою на монорейці – один із найпоширеніших засобів внутрішньоцехового транспортування.

1.2 Конструкція та принцип дії електромеханічних підйомників.

Електромеханічні підйомники утворюють найчисельнішу групу і поділяються, своєю чергою, залежно від конструкції тягового органу на три підвиди: з канатним

барабаном, з ходовим гвинтом і з ланцюговою зірковою шестернею. Детальний розгляд кожного з них наведений нижче.

Канатний барабанний підйомник визначається як найпоширенішим різновидом електромеханічного вантажопідйомного обладнання. Його кінематична схема включає три послідовно з'єднані елементи: електродвигун, редуктор та барабан із намотаним сталевим канатом.

Електродвигун, живлення якого здійснюється від трифазної мережі змінного струму напругою 380 В або 220 В, перетворює електричну енергію в механічну — обертальний рух валу. Оскільки номінальні оберти асинхронних двигунів, що застосовуються у підйомниках, зазвичай становлять 750-1500 об/хв, а необхідна швидкість обертання барабана — лише 10-60 об/хв, між двигуном і барабаном встановлюється редуктор.

Редуктор, це механізм зниження частоти обертання з одночасним підвищенням крутного моменту. Для підйомників застосовують циліндричні, конічно-циліндричні або черв'ячні редуктори з передавальним числом $i = 20-80$. Передавальне число визначає, у скільки разів оберти двигуна більші за оберти вихідного валу редуктора, і водночас — у скільки разів крутний момент на вихідному валу перевищує момент двигуна (за умови ідеальної передачі).

Барабан намотує та розмотує сталевий канат діаметром 8-20 мм, залежно від вантажопідйомності установки. При обертанні барабана в одному напрямку канат намотується, тяговий гак з вантажем підіймається; при реверсі двигуна відбувається опускання. Важливим вузлом визначається як електромагнітне гальмо, що автоматично затискає вал двигуна при знеструмленні та утримує вантаж у підвішеному стані.

У гвинтовому підйомнику обертальний рух двигуна перетворюється на поступальний рух платформи за допомогою пари «ходовий гвинт — ходова гайка». Гвинт з трапецієподібною або прямокутною різьбою приводиться в обертання двигуном внаслідок редуктор; ходова гайка, жорстко закріплена на платформі та утримувана від обертання напрямними, переміщується вздовж осі гвинта.

Принциповою перевагою гвинтового приводу визначається як ефект самогальмування: кут підйому різьби менший за кут тертя в парі, тому вантаж не може самостійно опуститися при відключеному двигуні. Це суттєво спрощує схему гальмування. Недоліком такої системи, є відносно невисока швидкість підйому (до 6 м/хв) та знос різьби при великих навантаженнях і частих циклах.

Гвинтові підйомники застосовують там, де потрібна висока точність позиціонування: у пресах, зварювальних позиціонерах, установках для калібрування та в складальних стендах машинобудівної промисловості.

Ланцюгова таль являє собою компактний підйомний агрегат, у якому електродвигун і редуктор розміщені в спільному корпусі та підвішуються до монорейки або балки мостового крана. Вихідний вал редуктора обертає зіркову шестерню, зуби якої захоплюють ланки каліброваного ланцюга. При цьому робоча гілка ланцюга тягне вантажний гак угору, тоді як слабка гілка провисає або складається у спеціальний мішок.

Головна перевага такої конструкції – модульність. Таль можна переміщувати вздовж монорейки вручну або за допомогою додаткового ходового електроприводу, що забезпечує можливість організувати гнучку внутрішньоцехову систему транспортування без стаціонарних кранів. Ланцюгові талі широко застосовуються в металургійних цехах, суднобудуванні та при монтажних роботах.

1.3 Вантажний підйомник шахтного типу.

Розглянемо більш детально вантажний підйомник шахтного типу, призначений для переміщення вантажів між складськими поверхами. Шахтні підйомники мають різне виконання і можуть експлуатуватися як всередині будівель, так і назовні. Простота конструкції таких підйомників дозволяє виконувати їх монтаж з урахуванням особливостей планування складських приміщень і в доволі короткі терміни. Кабіна підйомника, зазвичай виконується у вигляді кліті, що дозволяє значною мірою полегшити конструкцію і таким чином збільшити вантажопідйомність.

На рисунку 1.2 наведена типова конструкція шахтного вантажного підйомника.

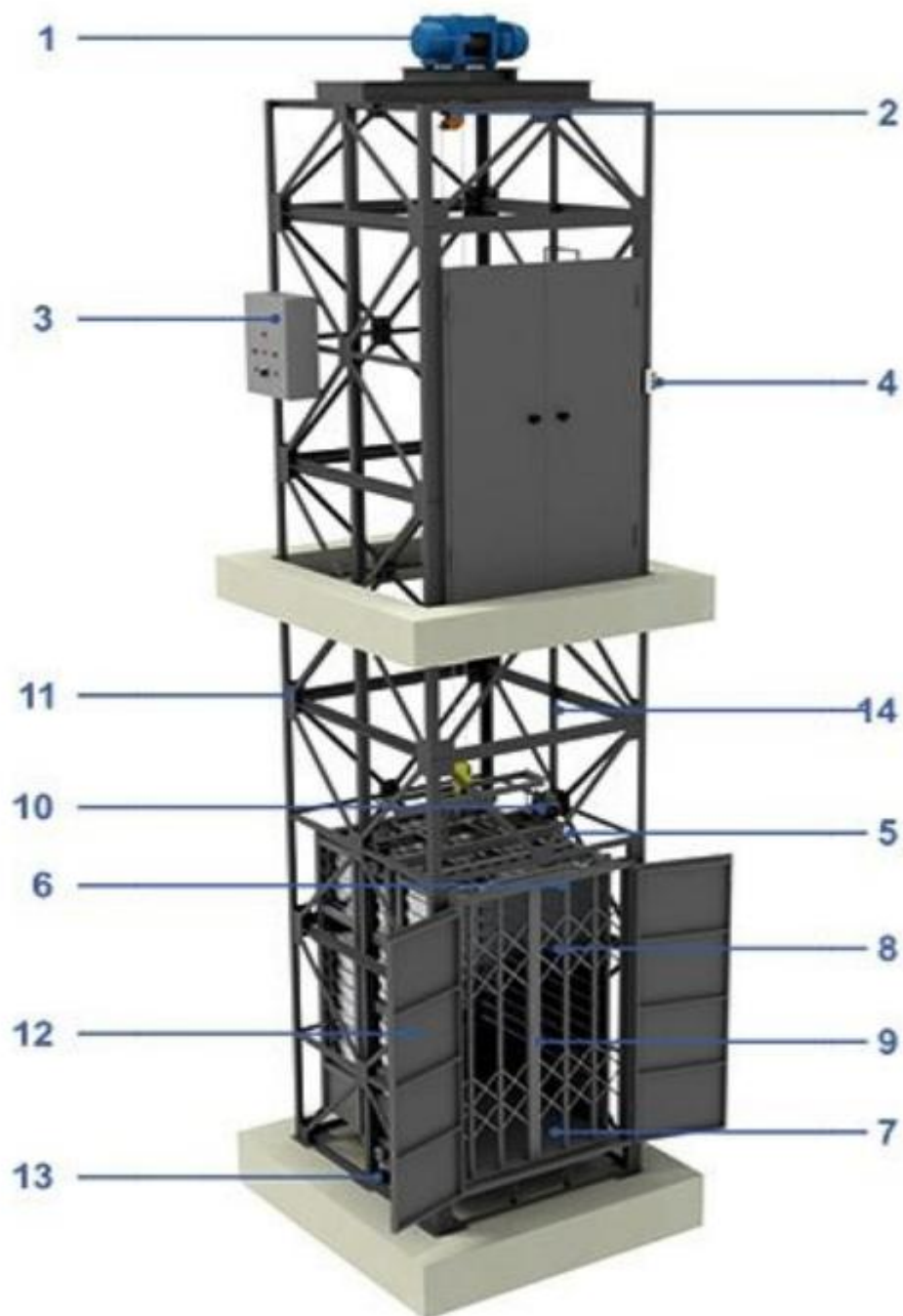


Рис. 1.2 – Шахтний підйомник в каркасній шахті.

1 – електропривод; 2 – розподільчий щиток; 3 – панель керування; 4 – кнопкові модулі;
5 – блокатор огорожень; 6 – кінцеві та аварійні вимикачі; 7 – кліть; 8 – решітка захисна; 9 –

двері кліті; 10 – обшивка; 11 – Каркас шахти; 12 – двері шахти; 13 – аварійні амортизатори; 14 – направляючі.

1.4 Типи електродвигунів у вантажопідйомних механізмах.

Вибір типу електродвигуна для підйомника визначається як одним із ключових проектних рішень, що визначає надійність, ефективність і вартість усієї установки. Основними критеріями визначається як вантажопідйомність і необхідний крутний момент, режим роботи (кількість пускань на годину, тривалість вмикання), умови навколишнього середовища, вимоги до регулювання швидкості та точності позиціонування.

У сучасних вантажопідйомних механізмах застосовуються чотири основні типи електродвигунів: асинхронний з короткозамкненим ротором, асинхронний з фазним ротором, двигун постійного струму та серводвигун.

Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (АД КЗ) визначається як найпоширенішим типом електродвигуна в усіх галузях промисловості, і вантажопідйомне обладнання не визначається як винятком. Його конструктивна простота, висока надійність і відсутність ковзних електричних контактів забезпечують мінімальні витрати на обслуговування та тривалий ресурс.

Статор двигуна характеризується трифазну обмотку, яка при підключенні до мережі змінного струму частотою 50 Гц створює обертове магнітне поле з синхронною швидкістю:

$$n_1 = 60 \cdot \frac{f}{p} \quad (1.1)$$

де f – частота мережі (Гц), p – кількість пар полюсів. Для двигунів з двома парами полюсів ($p = 2$) синхронна швидкість складає 1500 об/хв, з трьома парами ($p = 3$) – 1000 об/хв. Ротор виконаний у вигляді «білячої клітки» - алюмінієвих або мідних стрижнів, замкнених кільцями по торцях.

Обертове магнітне поле статора перетинає стрижні ротора й індукує в них ЕРС. Оскільки ротор являє собою замкнений провідний контур, наведена ЕРС зумовлює протікання струму. Взаємодія цього струму з магнітним полем породжує електромагнітну силу, що діє на стрижні ротора й спричинює його обертання. Ротор набирає швидкість n_2 , що завжди менша за синхронну n_1 , адже лише при наявності відносного руху між полем і ротором можлива індукція ЕРС і протікання струму. Це відставання характеризується величиною ковзання:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

У номінальному режимі ковзання асинхронних двигунів для підйомників становить 3–5%. При пуску ковзання дорівнює 100% (ротор нерухомий), при синхронній швидкості — 0% (теоретично недосяжний стан при навантаженні).

Для підйомників особливо важливий режим роботи двигуна. Стандарт ІЕС 60034 визначає декілька режимів. Безперервний (S1), короткочасний (S2) та повторно-короткочасний (S3). Підйомники, як правило, працюють у режимі S3 з тривалістю вмикання ПВ = 15-40%, тобто двигун протягом циклу активний лише відповідний відсоток часу, решту часу займає пауза, для охолодження

На відміну від КЗ ротора, у фазному роторі виконана повноцінна трифазна обмотка, виведена через контактні кільця і щітки назовні. Підключивши до ланцюга ротора пускові або регульовальні реостати, можна суттєво поліпшити пускові характеристики, знизити пусковий струм і водночас підвищити пусковий момент.

Фізично це пояснюється так: додатковий опір у колі ротора зміщує точку максимального моменту у бік більшого ковзання, що забезпечує великий момент вже при $s \approx 1$ (нерухомий ротор). У процесі розгону опір поступово виводять, й у номінальному режимі реостат повністю зашунтований.

Двигуни з фазним ротором застосовують у важких режимах роботи, таких як на порталних і козлових кранах, металургійних установках, де потрібен

контрольований пуск з великим навантаженням. Їхній суттєвий основний недолік це наявність щіткового апарату, що потребує регулярного обслуговування та заміни щіток, а також велика вартість, у порівнянні з АД КР.

Двигуни постійного струму (ДПС) тривалий час були основою регульованих електроприводів підйомних механізмів, завдяки широкому діапазону регулювання швидкості – від повзучої до номінальної та вище (при ослабленні поля). Керування здійснювалося за допомогою тиристорних перетворювачів за схемою регулювання напруги якоря при постійному потоці.

Однак ДПС вимагає регулярної заміни щіток колектора, що визначається як суттєве обмеження для важких режимів роботи з частими пусканнями. На сучасному етапі в нових проектах ДПС практично повністю витіснені асинхронними двигунами в парі з частотними перетворювачами, які забезпечують аналогічний діапазон регулювання без механічних контактів.

Серводвигуни (синхронні двигуни з постійними магнітами та енкодером зворотного зв'язку) застосовуються в підйомниках тоді, коли вирішальним визначається як точність позиціонування. Типова точність зупинки становить $\pm 0,1-1$ мм, що в десятки разів перевершує можливості звичайних асинхронних приводів. Такі системи застосовують у автоматизованих складських комплексах (системи AS/RS – Automated Storage and Retrieval Systems), роботизованих маніпуляторах і верстатах з ПЧК.

1.5 Режими пуску асинхронного двигуна з КЗ ротором у підйомниках.

Режим пуску визначається як одним із найвідповідальніших і водночас найнебезпечніших для обладнання моментів роботи підйомника. При прямому підключенні АД КЗ до мережі пусковий струм у 5-7 разів перевищує номінальний. Для двигуна потужністю 15 кВт це означає короткочасне споживання струму 150-200 А, що призводить до просідання напруги в мережі (небезпечне для суміжних споживачів), термічне навантаження на обмотки, механічний удар у зубчасті передачі редуктора та канат.

У зв'язку з цим у підйомниках застосовують чотири основні способи пуску, що відрізняються за вартістю, ефективністю та функціональністю.

Прямий пуск – підключення двигуна безпосередньо до мережі без будь-яких проміжних пристроїв. Це найпростіша і найдешевша схема, коли контактор подає повну напругу на обмотки статора, і двигун за секунди розганяється до номінальних обертів.

Незважаючи на простоту, прямий пуск практично неприйнятний для більшості підйомників. Ударне навантаження на редуктор скорочує його ресурс у декілька разів, а великий пусковий струм може призвести до спрацьовування захисної автоматики або знеструмлення суміжного обладнання. Міжнародний стандарт ISO 4301 допускає прямий пуск лише для допоміжних механізмів підйомників малої потужності (до 1,5-2,2 кВт) при рідкісних пусканнях.

Наступний метод, це пуск перемиканням зірка - трикутник (Y-Δ)

При схемі зірка - трикутник обмотки двигуна спочатку підключаються зіркою (Y), при якій напруга на кожній обмотці у $\sqrt{3} \approx 1,73$ рази менша, ніж при з'єднанні трикутником (Δ). Пусковий струм і пусковий момент при цьому зменшуються у три рази порівняно з прямим пуском. Після того як двигун розганяється до 70–80% від номінальних обертів, перемикач (зазвичай це пара контакторів з блокуванням) переключає обмотки в трикутник.

Головний основний недолік цього методу, стосовно підйомників, це трикратне зниження пускового моменту. Якщо момент опору навантаженого гака перевищує третину номінального моменту двигуна, двигун у режимі зірки не зможе зрушити вантаж з місця. Тому пуск Y-Δ допустимий тільки для ненавантажених або частково навантажених підйомників. Додатковий основний недолік – ударний перехідний процес у момент перемикання $Y \rightarrow \Delta$, що теж несприятливо впливає на механічну трансмісію.

$$I_n(Y) = \frac{I_n(\Delta)}{3}; M_n(Y) = \frac{M_n(\Delta)}{3} \quad (1.3)$$

Плавний пуск реалізується за допомогою тиристорного (або симісторного) регулятора напруги, що вбудовується між мережею і двигуном, так званим пристроєм плавного пуску (ППП). На початку пуску PPP подає на обмотки знижену напругу, поступово підвищуючи її до повного значення протягом налаштованого часу розгону (зазвичай 3 - 30 с).

На відміну від Y-Δ – пуску, забезпечує безперервне і плавне наростання напруги без стрибків. Пусковий струм знижується до 2 - 4 I_n , що суттєво зменшує просідання напруги в мережі та механічні навантаження. Прилад також виконує функції теплового захисту двигуна і може забезпечити м'яке гальмування при зупинці.

Обмеження PPP – неможливість регулювати швидкість у робочому режимі. Після завершення розгону тиристори повністю відкриваються й пристрій переходить у прозорий режим. Це означає, що для точного позиціювання або повільного підйому з номінальним моментом PPP не підходить.

Перетворювач частоти (ПЧ) – це перетворювач на базі сучасної силової електроніки, що формує на виході трифазну напругу довільної частоти та амплітуди за командою мікропроцесорного регулятора. Вхідна мережева напруга випрямляється діодним мостом, накопичується в конденсаторному ланцюгу постійного струму, а потім перетворюється інверторним блоком на IGBT-транзисторах у синусоїдальну напругу потрібної частоти методом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Плавно збільшуючи частоту від 0 до 50 Гц за налаштованою програмою розгону, ПЧ розганяє двигун від нульових обертів без жодного стрибка струму. При цьому підтримується постійне співвідношення V/f , що забезпечує постійний магнітний потік у двигуні і, відповідно, повний крутний момент при будь-якій швидкості (також на повзучій швидкості, що необхідно для точного позиціювання вантажу). В таблиці 1.1 наведено порівняння основних варіантів включення АДКЗ.

Таблиця 1.1 — Порівняльні характеристики способів пуску АД КЗ у підйомниках.

Спосіб пуску	I_n / I_n	M_n / M_n	Плавність	Рег. швидк.	Рекуперація	Відносна вартість
Прямий пуск	5–7	1,5–2,0	Відсутня	Ні	Ні	1×
Зірка–трикутник	1,7–2,3	0,5–0,7	Стрибок $Y \rightarrow \Delta$	Ні	Ні	1,2×
Плавний пуск	2–4	0,5–0,8	Плавна	Ні	Ні	2–3×
ПЧ (V/f)	1,0–1,5	1,0–1,5	Висока	Так (широкий)	Так	4–8×
ПЧ (вектор.)	1,0–1,2	1,5–2,0	Найвища	Так (прецизійне)	Так	6–10×

Рекуперація енергії, ще одна принципова основна перевага ПЧ. При гальмуванні або опусканні вантажу двигун переходить у генераторний режим: кінетична або потенційна енергія вантажу перетворюється на електричну і повертається в мережу внаслідок рекуперативний модуль. Для підйомників із частими циклами підйому/опускання економія електроенергії може складати 20 - 35%.

Крім регулювання швидкості й ефективного пуску, ПЧ виконує функції комплексного захисту, від перевантаження за струмом, перегріву двигуна (за вбудованим тепловим моделюванням або датчиком температури обмоток), обриву фаз, перенапруги та короткого замикання. Сучасні ПЧ мають вбудовані профілі ПІД-регулювання, підтримують промислові протоколи зв'язку (Modbus RTU, PROFIBUS, CANopen), що забезпечує можливість інтегрувати підйомник у єдину автоматизовану систему управління підприємством.

1.6 Вибір електродвигуна та способу пуску для конкретного підйомника.

Проектування електроприводу підйомника починається з визначення розрахункового статичного моменту на валу двигуна, який включає момент від вантажу, момент від маси рухомих частин механізму та момент тертя:

$$M_{\text{ст}} = \frac{(Q + G_{\text{п}}) \cdot g \cdot D_{\text{б}}}{2 \cdot i \cdot \eta} \quad (1.4)$$

де Q — маса вантажу (кг), $G_{\text{п}}$ — маса рухомої обойми та гака (кг), g — прискорення вільного падіння ($9,81 \text{ м/с}^2$), $D_{\text{б}}$ — діаметр барабана (м), i — передавальне число редуктора, η — ККД механічної передачі.

Необхідна потужність двигуна з урахуванням динамічних навантажень при пуску і гальмуванні:

$$P_{\text{дв}} = \frac{M_{\text{ст}} \cdot \omega \cdot k_{\text{пер}}}{\eta} = \frac{(Q + G_{\text{п}}) \cdot g \cdot v \cdot k_{\text{пер}}}{(60 \cdot \eta)} \quad (1.5)$$

де v — швидкість підйому (м/хв), $k_{\text{пер}}$ — коефіцієнт перевантаження (1,2-1,5 залежно від режиму).

Вибраний за каталогом двигун перевіряється за трьома умовами: номінальна потужність не менша за розрахункову, пусковий момент перевищує момент статичного навантаження з урахуванням коефіцієнта запасу, тепловий режим відповідає класу ізоляції (F або H для крановиків) і тривалості вмикання.

Щодо вибору способу пуску, наявна методика рекомендує таку логіку рішення: якщо потужність двигуна не перевищує 2,2 кВт і кількість пускань менше 30 за годину — допустимий прямий пуск. Для потужностей 2,2 - 15 кВт і помірного режиму роботи доцільний плавний пуск. При потужності понад 15 кВт, частих пусканнях або вимогах до регулювання швидкості — використовується перетворювач частоти, що на сучасному етапі визначається як загальновизнаним стандартом для нових проєктів промислових підйомників.

У цьому розділі проведено аналіз класифікації вантажних підйомників та детально розглянуто конструктивні різновиди електромеханічних підйомних механізмів. Встановлено, що канатні барабанні підйомники визначається як найбільш універсальними та поширеними, тоді як гвинтові забезпечують найвищу точність позиціонування, а ланцюгові талі – максимальну гнучкість при організації внутрішньоцехової логістики.

Визначено, що асинхронний двигун з короткозамкненим ротором є оптимальним вибором для переважної більшості промислових підйомників у результаті поєднання надійності, невибагливості до обслуговування та широких можливостей регулювання при використанні ПЧ. Детальний аналіз режимів пуску показав, що прямий пуск і схема зірка–трикутник мають суттєві обмеження стосовно підйомного обладнання, тоді як ПЧ забезпечує оптимальні пускові характеристики, регулювання швидкості та рекуперацію енергії і визначається як рекомендоване рішення для нових установок.

Отримані теоретичні результати складають основу для розрахунку та вибору компонентів електроприводу підйомника, що визначається як предметом наступного розділу дипломної роботи.

2 РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА СЕРІЇ АІР ДЛЯ ПРИВОДУ ВАНТАЖНОГО ПІДЙОМНИКА

2.1 Технічні умови для розрахунку.

Вибір і перевірка електродвигуна виконуються для приводу механізму підйому вантажного підйомника за технічними характеристиками, які наведені в табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Основні параметри для вибору електродвигуна

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Вантажопідйомність підйомника	Q	2500	кг
Маса рухомих частин (гак, обойма, канат)	G _п	200	кг
Швидкість підйому вантажу	v	0,50	м/с
ККД механічної передачі	$\eta_{\text{мех}}$	0,88	-
Передавальне число редуктора	i	50	-
Діаметр барабана (по осі каната)	D _б	0,32	м
Режим роботи двигуна	-	S3, ПВ = 40%	-
Група режиму механізму (ISO 4301)	-	M3	-
Коефіцієнт перевантаження (з ЧП)	k _{пер}	1,08	-
Середній коефіцієнт завантаження	β	0,70	-
Номінальна напруга мережі	U _н	380	В
Частота мережі	f	50	Гц

2.2 Розрахунок необхідної потужності.

Сумарна вага вантажу і рухомих частин механізму:

$$F = (Q + G_{\text{п}}) \cdot g = (2500 + 200) \cdot 9.81 = 26487.0 \text{ Н} \approx 26.49 \text{ кН} \quad (2.1)$$

де $Q = 2500$ кг – маса вантажу; $G_{\text{п}} = 200$ кг – маса рухомих частин (гак, рухома обойма, підвіска, розрахункова довжина каната).

Статична потужність, необхідна для рівномірного підйому вантажу зі швидкістю $v = 0,5$ м/с:

$$P_{\text{ст}} = F \cdot v = 26487.0 \cdot 0.5 = 13243.5 \text{ Вт} \approx 13.24 \text{ кВт}. \quad (2.2)$$

З урахуванням ККД механічної передачі $\eta_{\text{мех}} = 0,88$, що охоплює втрати у редукторі, підшипниках барабана і відхиляючих блоках:

$$P_{\text{двст}} = \frac{P_{\text{ст}}}{\eta_{\text{мех}}} = 13,243 / 0,88 = 15,049 \text{ кВт} \approx 15,0 \text{ кВт}. \quad (2.3)$$

При застосуванні ПЧ з векторним керуванням пусковий момент не перевищує $1,3 M_{\text{н}}$, що суттєво знижує динамічне навантаження порівняно зі схемою прямого пуску. Коефіцієнт перевантаження $k_{\text{пер}} = 1,08$ (замість 1,25 при прямому пуску):

$$P_{\text{розр}} = P_{\text{двст}} \cdot k_{\text{пер}} = 15,05 \cdot 1.08 = 16,25 \text{ кВт}. \quad (2.4)$$

Двигун працює у повторно-короткочасному режимі S3 з тривалістю вмикання ПВ = 40%. За методом еквівалентної потужності допустимо застосувати двигун з нижчою номінальною потужністю (режим S1), оскільки в паузах обмотки охолоджуються. Перерахунок еквівалентної потужності:

$$P_{\text{ер}} = P_{\text{розр}} \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{100}} = 10,28 \text{ кВт.} \quad (2.5)$$

З ряду стандартних потужностей найближчий більший типорозмір двигуна, становить 15 кВт. Попередньо обираємо двигун AIP160S4, та виконаємо перевірку за максимальним моментом і тепловим режимом.

Серія AIP відповідає ДСТУ ГОСТ 28330:2010. Двигун AIP 160 S4 чотириполюсний ($p = 2$), синхронна швидкість 1500 об/хв, виконання IP54, клас ізоляції F.

2.3 Перевірка двигуна AIP 160 S4 за умовами роботи.

Перевірка відповідності швидкості підйому

Визначаємо передавальне число редуктора, необхідне для забезпечення заданої швидкості підйому $v = 0,5 \text{ м/с}$ при номінальній швидкості двигуна $n_n = 1455 \text{ об/хв}$:

$$i_{\text{розр}} = \frac{\pi \cdot D_6 \cdot n_n}{60 \cdot v} = 48,75. \quad (2.6)$$

Прийнято стандартне передавальне число редуктора $i = 50$. Фактична швидкість підйому:

$$v_{\phi} = \frac{\pi \cdot D_6 \cdot n_n}{60 \cdot i} = 0,487 \text{ м/с,} \quad (2.7)$$

що відхиляється від заданої швидкості $0,5 \text{ м/с}$ лише на $2,6\%$ - у межах допустимого відхилення ($\pm 5\%$).

Момент статичного навантаження на валу двигуна.

Розрахунковий момент на валу двигуна при підйомі повного вантажу:

$$M_{\text{дв}} = \frac{F \cdot D_6 / 2}{i \cdot \eta_{\text{мех}}} = 96,32 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.8)$$

Перевірка за максимальним моментом.

Номінальний момент двигуна AIP160S4:

$$M_{\text{н}} = 9550 \cdot \frac{P_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} = 98,5 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.9)$$

Максимальний момент двигуна ($\lambda = 2,3$):

$$M_{\text{max}} = \lambda \cdot M_{\text{н}} = 226,55 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.10)$$

Умова за максимальним моментом:

$$M_{\text{max}} = 226,55 \text{ Н} \cdot \text{м} > M_{\text{дв}} = 96,32 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.11)$$

Ступінь завантаження двигуна за моментом: $\beta_{\text{М}} = M_{\text{дв}} / M_{\text{н}} = 96,32 / 98,5 = 0,978 = 97,8\%$.

Двигун завантажений на 97,8% від номінального моменту – це комфортний рівень завантаження, що забезпечує значний запас по моменту і надійний пуск з вантажем.

Проведемо також перевірку за тепловим режимом.

Потужність, що фактично споживається двигуном при підйомі вантажу:

$$P_{\text{спож}} = M_{\text{дв}} \cdot n_{\text{н}} = 14,68 \text{ кВт}. \quad (2.12)$$

Еквівалентна потужність при режимі S3, ПВ = 40% і повному завантаженні ($\beta = 1,0$):

$$P_{\text{екв}} = P_{\text{спож}} \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{100}} = 9,28 \text{ кВт.} \quad (2.13)$$

Порівняння з номінальною потужністю двигуна:

$$P_{\text{екв}} = 9,28 \text{ кВт} < P_{\text{н}} = 15 \text{ кВт} - \text{умова виконана.}$$

Умова теплового режиму при повному завантаженні виконується: еквівалентна потужність 9,28 кВт менша за номінальну 15 кВт на 38.1%. Запас по тепловому режиму складає 38.1% - це означає, що двигун не перегріватиметься навіть при підйомі повного вантажу у кожному циклі.

При середньому коефіцієнті завантаження $\beta = 0,70$ (реальна умова експлуатації, коли не кожен підйом з повним вантажем):

$$P_{\text{екв}\beta} = 6,50 \text{ кВт} \ll 15 \text{ кВт.}$$

У режимі часткового завантаження ($\beta = 0,70$) еквівалентна потужність 6,50 кВт, що складає лише 43,3% від номінальної – двигун працює з великим тепловим запасом.

При прямому пуску пусковий струм двигуна:

$$I_{\text{п}} = 207,9 \text{ А.} \quad (2.14)$$

При пуску з використанням ПЧ з векторним керуванням струм обмежується до 1,0–1,3 $I_{\text{н}}$:

$$I_{\text{пПЧ}} = 1,25 \cdot I_{\text{н}} = 37,1 \text{ А.} \quad (2.15)$$

Пусковий струм внаслідок ПЧ у 5,6 разів менший, ніж при прямому пуску, що повністю виключає ударні механічні навантаження і просідання напруги у мережі.

За результатами всіх перевірок двигун AIP 160 S4 потужністю 15 кВт повністю відповідає умовам роботи вантажного підйомника вантажопідйомністю 2500 кг. Зведений підсумок перевірок:

Таблиця 2.2 – Підсумок перевірок двигуна AIP160S4 для підйомника 2500кг.

Умова перевірки	Розрахункове значення	Допустиме значення	Результат
Максимальний момент	$M_{\max} = 246,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$M_{\text{дв}} = 96,32 \text{ Н} \cdot \text{м}$	✓ Виконано
Ступінь завантаження за М	$\beta_M = 97,8\%$	$\leq 100\%$	✓ Виконано
Тепловий режим ($\beta = 1,0$)	$P_{\text{екв}} = 9,28 \text{ кВт}$	$P_H = 15 \text{ кВт}$	✓ Виконано
Тепловий режим ($\beta = 0,70$)	$P_{\text{екв}} = 6,50 \text{ кВт}$	$P_H = 15 \text{ кВт}$	✓ Виконано
Швидкість підйому	$v_{\text{факт}} = 0,487 \text{ м/с}$	$v = 0,50 \text{ м/с } (\pm 5\%)$	✓ Виконано
Пусковий струм (ЧП)	$I_P = 37,1 \text{ А}$	$1,3 \cdot I_H = 38,6 \text{ А}$	✓ Виконано

Отже, на основі проведеного аналізу ми можемо зробити висновок про правильність вибору електродвигуна для приводу вантажного підйомника. В табл. 2.3 наведені основні технічні параметри вибраного двигуна

Таблиця 2.3 – технічні характеристики двигуна AIP160S4.

Параметр	Значення
----------	----------

Потужність	15 кВт
Синхронна частота обертання	1500 об/хв
Номінальна частота обертання	1460 об/хв
Напруга живлення	3ф 380В 50Гц
Номінальний струм, I_n	30 А
Номінальний Момент, M_n	98,12 Нм
ККД	89,4%
Співвідношення I_p/I_n	7,5
Співвідношення M_p/M_n	2,2
Співвідношення $M_{\text{макс}}/M_n$	2,3
Момент інерції	0,06 кгм ²
Вага	126 кг

2.4 Параметри схеми заміщення.

Параметри Т-подібної схеми заміщення двигуна AIP160S4, необхідні для побудови математичної моделі у просторі станів (розділ 3), визначаються аналітичним методом за каталожними даними.

Номінальне ковзання:

$$s_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1} = 0,027 \quad (2.16)$$

Критичне ковзання внаслідок кратності максимального моменту $\lambda = 2,3$:

$$s_k = s_n \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,117 \quad (2.17)$$

Значення активних опорів і індуктивностей уточнені за методикою аналітичного визначення параметрів схеми заміщення і наведені в табл. .

Таблиця 2.4 – Параметри схеми заміщення двигуна AIP 160 S4.

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Активний опір обмотки статора	R_s	0,55	Ом
Активний опір обмотки ротора (зведений)	R_r	0,42	Ом
Індуктивність розсіювання статора	L_{ls}	2,0	мГн
Індуктивність розсіювання ротора	L_{lr}	2,0	мГн
Взаємна (намагнічувальна) індуктивність	L_m	56,0	мГн
Повна індуктивність статора $L_s = L_{ls} + L_m$	L_s	58,0	мГн
Повна індуктивність ротора $L_r = L_{lr} + L_m$	L_r	58,0	мГн
Коефіцієнт розсіювання $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s \cdot L_r)$	σ	0,038	
Електромагнітна постійна часу ротора $\tau_r = L_r / R_r$	τ_r	0,138	с
Момент інерції ротора	J	0,065	кг·м ²
Кількість пар полюсів	P	2	

Було виконано розрахунок і вибір електродвигуна серії АІР для приводу вантажного підйомника вантажопідйомністю 2500 кг (швидкість підйому $v = 0,5$ м/с, режим S3, ПВ = 40%).

Також були встановлені наступні початкові умови.

По-перше, необхідна статична потужність на валу двигуна при підйомі повного вантажу складає $P_{двст} = 15,05$ кВт. З урахуванням режиму S3 (ПВ = 40%) і коефіцієнта

перевантаження при застосуванні ПЧ розрахункова еквівалентна потужність складає 10,28 кВт.

По-друге, двигун AIP160S4 потужністю 15 кВт успішно пройшов усі перевірки: максимальний момент $M_{\max} = 246,1 \text{ Н}\cdot\text{м}$ перевищує статичний момент навантаження $M_{\text{дв}} = 96,32 \text{ Н}\cdot\text{м}$; еквівалентна потужність у режимі S3 при повному завантаженні $P_{\text{екв}} = 9,28 \text{ кВт}$ менша за номінальну 15 кВт; ступінь завантаження за моментом $\beta_M = 97,8\%$ свідчить про оптимальний запас по моменту.

По-третє, вантажопідйомність у 2500 кг, у поєднанні із застосуванням частотного перетворювача, забезпечує можливість з великим запасом використовувати двигун AIP160S4 (15 кВт), який був визначений як базовий об'єкт дипломної роботи. Визначені параметри схеми заміщення використовуються у математичній моделі АД КЗ (розділ 3) та у моделі Simulink.

2.5 Перетворювач частоти як засіб керування асинхронним двигуном.

Широке впровадження асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором у системи автоматизованого електроприводу стало можливим передусім завдяки розвитку силової перетворювальної техніки. Якщо у 1970-х роках регулювання швидкості АД КЗ вважалося складним і нерентабельним завданням, то сьогодні частотний перетворювач є масовим і відносно недорогим продуктом, доступним для установок потужністю від десятків ватів до десятків мегаватів. У вантажопідйомній техніці ПЧ перетворився на галузевий стандарт, поступово витісняючи реостатне керування, схеми зірка–трикутник і навіть приводи на базі двигунів постійного струму. У цьому розділі розглядаються принцип роботи ПЧ, його структурні складові та всебічно обґрунтовується доцільність його застосування у системах керування АД КЗ вантажних підйомників.

Перетворювач частоти – це силовий електронний пристрій, що перетворює напругу мережі змінного струму фіксованої частоти (50 Гц, 380 В) у напругу змінного струму довільної частоти та амплітуди. За принципом побудови силового ланцюга всі

сучасні ПЧ поділяються на дві великі групи: перетворювачі з проміжним ланцюгом постійного струму (DC link) та безпосередні матричні конвертори.

Переважає більшість промислових ПЧ, понад 95% ринку, реалізована за схемою з DC link. Силовий тракт такого перетворювача складається з трьох послідовно з'єднаних функціональних блоків: вхідного випрямляча, ланцюга постійного струму та вихідного інвертора. Кожен блок виконує свою функцію у загальному процесі перетворення енергії і суттєво впливає на якість вихідного сигналу та ефективність системи.

Безпосередні матричні конвертори комутують вхідні фази безпосередньо на вихідні за допомогою матриці двонаправлених ключів (9 ключів для трифазної схеми 3×3). Відсутність DC link позбавляє від електролітичних конденсаторів – найменш надійного елемента традиційного ПЧ і забезпечує природну двонаправлену передачу потужності. Однак складність алгоритмів комутації та вища вартість обмежують їх застосування спеціалізованими установками. Надалі розглядається виключно ПЧ з DC link, як найбільш поширений тип у вантажопідйомній техніці.

2.6 Принцип дії та структурні складові перетворювача частоти.

Вхідний випрямляч перетворює трифазну напругу мережі 380 В / 50 Гц у постійну напругу на шині DC link. У найпростішому і найпоширенішому варіанті це некерований діодний міст. Шість діодів утворюють катодну і анодну групи: у кожен момент часу провідними є два діоди з найбільшою різницею потенціалів. Середнє значення випрямленої напруги:

$$U_{dc} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{л} \approx 1,35 \cdot U_{л}, \quad (2.18)$$

де $U_{л}$ – лінійна напруга мережі. Для $U_{л} = 380$ В отримуємо $U_{dc} \approx 513$ В. Реально, з урахуванням падіння напруги на діодах і імпедансі мережі, $U_{dc} \approx 500-520$ В. Пульсації

мають частоту 300 Гц (шестикратна частота мережі) і згладжуються конденсаторним фільтром DC link.

Шестипульсний діодний міст має суттєвий недолік: споживаний від мережі струм не є синусоїдальним — він містить вищі гармоніки 5, 7, 11, 13-го порядків. Коефіцієнт гармонічних спотворень (THDi) некерованого випрямляча складає 30–80% і без додаткових заходів перевищує обмеження стандарту EN 61000-3-12. Для зменшення THD застосовують: вхідний АС-дросель (знижує THD до 30-40%); 12-пульсну схему на двох мостах зі зміщенням 30° ($\text{THD} \approx 10\text{-}12\%$); активний фронтальний перетворювач (AFE, Active Front End) – керований IGBT-інвертор замість діодного моста, що забезпечує $\text{THD} < 5\%$ і природну рекуперацію енергії назад у мережу.

AFE є обов'язковим вибором для підйомників з частими циклами гальмування (металургійні крани, шахтні підйомники), де рекуперативна потужність при опусканні вантажу може складати 60-90% від встановленої потужності двигуна. Без рекуперації ця енергія розсіювалася б на гальмівних резисторах, що є неефективним і потребує додаткового охолодження шафи керування.

Ланцюг постійного струму, DC link, є буферним енергетичним резервуаром між випрямлячем і інвертором. Його основний елемент — конденсатор або батарея конденсаторів ємністю C_{dc} . Функції DC link: згладжування пульсацій випрямленої напруги; короткочасне накопичення кінетичної енергії при гальмуванні двигуна до підключення гальмівного резистора або активації рекуперації; електрична розв'язка між вхідним і вихідним ланцюгами.

Необхідна ємність DC link визначається з умови обмеження пульсацій напруги ΔU_{dc} :

$$C_{dc} \geq \frac{I_{dcmax}}{6 \cdot f \cdot \Delta U_{dc}} \quad (2.19)$$

де I_{dcmax} – максимальний струм навантаження; ΔU_{dc} – допустима амплітуда пульсацій (зазвичай 5-10% від U_{dc}). Для ПЧ потужністю 15 кВт типова ємність C_{dc} становить 2200-4700 мкФ. При гальмуванні двигуна енергія надходить у DC link і заряджає конденсатор – напруга зростає. При досягненні порогу $U_{dcmax} \approx 750-800$ В ПЧ вмикає гальмівний IGBT-транзистор, що підключає гальмівний резистор і розсіює надлишок енергії.

Електролітичні конденсатори DC link є найменш надійним елементом ПЧ: їхній розрахунковий ресурс – 50000-100000 годин при температурі 40 °С, але суттєво скорочується при перегріві (кожні +10 °С зменшують ресурс удвічі за законом Арреніуса). Саме тому система охолодження ПЧ є критично важливою для довговічності всього приладу, а виробники вантажопідйомного обладнання рекомендують встановлювати ПЧ у кліматизованих електрошафах.

Вихідний інвертор перетворює постійну напругу DC link у трифазну напругу змінного струму довільної частоти і амплітуди. Він реалізований у вигляді трифазного мостового інвертора напруги (Voltage Source Inverter, VSI) на шести IGBT-транзисторах із антипаралельними зворотними діодами. Кожне плече інвертора містить верхній і нижній ключ, що підключають відповідну фазу двигуна до шин «+» і «-» DC link. Одночасне ввімкнення обох ключів одного плеча (наскрізний струм) є аварійним і виключається апаратними блокуваннями через мертвий час (dead-time) 0,5-3 мкс між перемиканнями.

Керування IGBT здійснюється методом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ, PWM). Мікропроцесор ПЧ генерує трифазну синусоїдальну модульовальну функцію бажаної частоти $f_{вих}$ і амплітуди, порівнює її з трикутним несучим сигналом частотою $f_{нес}$ (2-16 кГц). Коли синусоїда перевищує трикутник – вмикається верхній ключ плеча (фаза підключається до «+»); коли менше – нижній ключ (фаза підключається до «-»). Результатом є послідовність імпульсів із змінною шириною, середнє значення якої на інтервалі несучого сигналу відповідає миттєвому значенню бажаної синусоїди.

Найбільш досконалим алгоритмом є просторово-векторна ШІМ (Space Vector PWM, SVPWM). Вона розглядає всі вісім можливих станів інвертора – шість активних

векторів напруги (V1-V6) і два нульових (V0, V7) – і формує вихідний вектор напруги як зважену суму двох сусідніх активних і нульових векторів за кожен період несучої. SVPWM забезпечує на 15% вищу максимальну вихідну напругу порівняно з класичною синусоїдальною ШІМ при тій самій напрузі DC link, менший рівень гармонік і природну сумісність з алгоритмами векторного керування FOC, де керуючий сигнал вже представлений у вигляді вектора напруги.

Частота несучої $f_{\text{нec}}$ визначає компроміс між якістю вихідного струму і перемикальними втратами в IGBT. Висока $f_{\text{нec}}$ (8-16 кГц) дає квазісинусоїдальний струм двигуна з низьким рівнем вищих гармонік і мінімальним акустичним шумом, але пропорційно збільшує втрати і нагрів ПЧ. Для вантажних підйомників промислового застосування оптимальна $f_{\text{нec}} = 4-8$ кГц як компроміс між якістю струму і ефективністю.

2.7 Алгоритми керування перетворювача частоти.

Скалярне керування, це найпростіший алгоритм, що реалізує підтримання постійного відношення амплітуди вихідної напруги до частоти: $V/f = \text{const}$. Фізичне обґрунтування: відповідно до рівняння ЕРС статора

$$e_s \approx \omega_s \cdot \Psi_s, \quad (2.20)$$

підтримання $V/f = \text{const}$ забезпечує постійний магнітний потік і, отже, постійний максимальний момент у всьому діапазоні частот. При малих частотах (до 5-10 Гц) активний спад напруги на R_s порівнянний зі спадом на індуктивності, тому вводять IR-компенсацію (voltage boost) для підтримки потоку.

Переваги V/f : простота реалізації; не потребує датчика швидкості; стійкість до параметричної невизначеності; можливість керування кількома паралельними двигунами від одного ПЧ. Недоліки: точність регулювання швидкості $\pm 3-5\%$ через змінне ковзання; відсутність регулювання моменту; неможливість забезпечити

повний момент при нульовій швидкості. Для підйомників V/f прийнятний лише у найпростіших допоміжних механізмах без вимог до точності позиціювання.

Векторне керування (Field Oriented Control, FOC), реалізує незалежне керування потоком і моментом двигуна – так само, як у двигуні постійного струму з незалежним збудженням. Практична реалізація FOC у ПЧ включає чотири функціональних блоки.

Блок вимірювання: датчики Холла вимірюють миттєві значення струмів двох фаз (третій визначається як мінус сума двох). Перетворення Кларка дає компоненти i_{sa} , i_{sb} у нерухомій системі. Перетворення Парка з кутом $\theta_{\psi r}$ дає компоненти i_{sd} і i_{sq} у системі, орієнтованій за потоком ротора.

Блок оцінки потоку (програмний спостерігач): оскільки пряме вимірювання Ψ_r потребує додаткових датчиків у зазорі двигуна, у більшості ПЧ застосовують модель ротора у нерухомій системі $\alpha\beta$ для програмної оцінки вектора потоку та кута $\theta_{\psi r}$. Якщо додатково встановлений енкодер швидкості – це «пряме FOC» з датчиком (точність вища); без енкодера – «безсенсорне FOC», що оцінює ω_r з рівнянь моделі двигуна.

Контури регулювання: зовнішній ПІ-регулятор швидкості формує завдання i_{sq}^* . Внутрішній ПІ-регулятор потоку утримує i_{sd} на номінальному рівні. Два незалежні ПІ-регулятори внутрішнього контуру формують завдання напруг u_{sd}^* , u_{sq}^* . Перехресні зв'язки між осями d і q компенсуються у прямому ланцюгу (feed-forward decoupling), що дозволяє розглядати канали потоку і моменту як незалежні лінійні об'єкти.

Блок ШІМ: зворотне перетворення Парка і Кларка переводить u_{sd}^* , u_{sq}^* у трьохосову систему u_{sA}^* , u_{sB}^* , u_{sC}^* , що надходить на алгоритм SVPWM інвертора. Час відгуку FOC на зміну завдання моменту – 5-10 мс; точність регулювання швидкості з енкодером – $\pm 0,01\%$ від номінальної.

Пряме керування моментом (Direct Torque Control, DTC), запропоноване Такахаші (1986) і комерціалізоване АВВ у серії ACS600, є альтернативою FOC. DTC керує безпосередньо модулем поточкозчеплення статора і електромагнітним моментом через таблицю оптимальних перемикачів інвертора – без ШІМ і без системи координат dq. Гістерезисні компаратори порівнюють оцінені значення $|\Psi_s|$ і M_{em} із заданими і вибирають один із восьми векторів напруги інвертора. DTC забезпечує час відгуку

моменту менше 1 мс (у 5-10 разів швидше, ніж FOC з ШІМ), але має змінну частоту комутацій і дещо вищі пульсації моменту. У підйомниках DTC застосовується там, де потрібна максимальна динаміка при гальмуванні і аварійних зупинках.

2.8 Обґрунтування застосування ПЧ з АД КЗ у вантажному підйомнику.

Сукупність технічних і економічних характеристик системи «ПЧ + АД КЗ» визначає беззаперечні переваги перед альтернативними рішеннями для вантажних підйомників. Обґрунтування проводиться за шістьма ключовими критеріями.

Як показано у розділі 3, пусковий струм при FOC-керуванні не перевищує 1,2-1,3 I_n , що у 5-6 разів менше, ніж при прямому пуску. Теплове навантаження обмоток менше у 55 разів, що пропорційно збільшує розрахунковий ресурс ізоляції. Відсутність механічного удару при пуску суттєво продовжує ресурс редуктора, каната і з'єднувальних муфт. За даними виробників редукторів (Flender, SEW-Eurodrive), перехід з прямого пуску на частотний знижує знос зубчастих пар у 3–5 разів, що збільшує міжремонтний інтервал з 2 до 6-10 років і знижує витрати на планово-попереджувальне обслуговування.

ПЧ забезпечує плавне регулювання швидкості у діапазоні 1:50 (V/f) до 1:1000 і більше (FOC з енкодером). Для підйомників це дозволяє реалізувати «повзучу» швидкість (2-5% від номінальної) при точному підведенні гака до вантажу або при позиціонуванні по висоті. Похибка регулювання швидкості: $\pm 3-5\%$ (V/f), $\pm 0,1\%$ (sensorless FOC), $\pm 0,01\%$ (FOC з енкодером). Для складських підйомників з адресним позиціонуванням точність зупинки $\pm 1-5$ мм досягається комбінацією FOC з енкодером і програмним S-профілем уповільнення. Жодне з альтернативних рішень (прямий пуск, Y- Δ , soft starter) не забезпечує регулювання швидкості взагалі.

При опусканні вантажу або гальмуванні двигун переходить у генераторний режим, і потенційна або кінетична енергія вантажу перетворюється на електричну. Рекуперативна потужність при опусканні номінального вантажу:

$$P_{\text{рек}} = Q \cdot g \cdot v \cdot \eta_{\text{мех}}, \quad (2.21)$$

де Q – маса вантажу (кг), $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, v – швидкість опускання (м/с), $\eta_{\text{мех}}$ – ККД механічної передачі. Для підйомника вантажопідйомністю 2,5 т і швидкістю 0,5 м/с: $P_{\text{рек}} \approx 10,5 \text{ кВт}$. При 200 циклах підйом–опускання за робочу зміну (8 год) і часі опускання 30 с на цикл загальна рекуперована енергія: $E_{\text{рек}} \approx 17,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ за зміну. При тарифі 7,5 грн/кВт·год це 132 грн на зміну або близько 45 000 грн на рік при 260 робочих днях. Термін окупності додаткових витрат на AFE-модуль (15–25% від вартості базового ПЧ) складає 1–3 роки.

Сучасний ПЧ для підйомників інтегрує комплекс захистів відповідно до НПАОП 0.00-1.01-18 та Директиви ЄС 2006/42/ЕС: захист від перевантаження (електронне теплове реле, точність $\pm 5\%$); захист від перегріву двигуна через вбудований термістор РТС; захист від обриву фази та несиметрії напруг; захист від перенапруги і недонапруги DC link. Ключова функція безпеки – Safe Torque Off (STO), сертифікована за рівнем SIL 2 (IEC 61508) / PLd (EN 13849-1): апаратне блокування затворів IGBT двома незалежними каналами без відключення живлення ПЧ. Функція Anti-gravity (утримання моменту до відпускання механічного гальма) виключає просідання гака при пуску. Наявність цих функцій у ПЧ дозволяє суттєво спростити зовнішню схему захистів і знизити вартість системи безпеки підйомника.

ККД сучасних ПЧ при номінальному навантаженні складає 97-98,5%. Повний ККД системи «ПЧ + АД КЗ»:

$$\eta_{\text{сист}} = \eta_{\text{ПЧ}} \cdot \eta_{\text{АД}} \approx 0,975 \cdot 0,91 \approx 0,89. \quad (2.22)$$

Для порівняння: система «тиристорний перетворювач + ДПС» має $\eta_{\text{сист}} \approx 0,82$. Перевага АД КЗ з ПЧ у ефективності становить близько 8-10% від споживаної потужності. Крім того, ПЧ з FOC реалізує алгоритм оптимізації потоку: при навантаженні менше 50% від номінального намагнічувальний струм i_{sd} автоматично знижується, зменшуючи втрати у міді статора і сталі магнітопроводу. Це суттєво

підвищує ефективність у характерному для підйомників режимі S3, коли середнє навантаження складає 30–60% від номінального.

АД КЗ у парі з ПЧ є системою без механічного зносу у силовому ланцюгу: відсутні щітки, колектор і контактні кільця. Єдині вузли, що потребують планового обслуговування: підшипники двигуна (кожні 15000-20000 год), вентилятори охолодження ПЧ (кожні 30000-50000 год) і конденсатори DC link (кожні 50000-100000 год). Для порівняння: АД з фазним ротором потребує заміни щіток кожні 2000-4000 год і полірування контактних кілець кожні 8000-12000 год. Загальна вартість технічного обслуговування системи «ПЧ + АД КЗ» за 10 років, за оцінками провідних виробників, у 2,5-4 рази нижча порівняно з системами на базі АД ФР або ДПС.

2.9 Вибір перетворювача частоти для електродвигуна AIP160S4.

Вибір частотного перетворювача виконується для системи електроприводу вантажного підйомника вантажопідйомністю 2500 кг на базі двигуна AIP160S4 (15 кВт, 380 В, $I_n = 30$ А, $\cos\phi = 0,87$). Основні критерії вибору ПЧ:

Номінальна вихідна потужність – 15кВт;

Номінальний вихідний струм – >30А;

Струм перевантаження – >150%;

Алгоритм керування – векторний;

Режим роботи – S3, ПВ=40%.

Розрахунок параметрів вибору ПЧ.

Номінальний вихідний струм ПЧ вибирається з урахуванням коефіцієнта запасу $k_3 \geq 1,1-1,25$ відносно номінального струму двигуна:

$$I_{ПЧ} \geq k_3 \cdot I_n = 34,2 \text{ А.}$$

Додатково перевіряється умова перевантаження: ПЧ повинен забезпечувати струм 150% від номінального протягом 60 с для підйому вантажу з місця:

$$I_{\text{пускПЧ}} \geq 1,5 \cdot 34,2 = 51,3 \text{ А протягом 60 с.} \quad (2.23)$$

Потужність гальмівного резистора для розсіювання енергії при опусканні номінального вантажу ($Q = 2500 \text{ кг}$, $v = 0,5 \text{ м/с}$, $\eta = 0,88$):

$$P_{\text{гр}} = Q \cdot g \cdot v \cdot \eta \approx 11 \text{ кВт.} \quad (2.24)$$

При застосуванні вбудованого гальмівного транзистора ПЧ підключається зовнішній гальмівний резистор потужністю не менше 11 кВт (тривалий) або 22 кВт (для пікових режимів з коефіцієнтом 2).

За результатами порівняльного аналізу для системи електроприводу вантажного підйомника вантажопідйомністю 2500 кг обирається частотний перетворювач Danfoss FC-102P18K5T4 потужністю 18,5 кВт. Обґрунтування вибору: наявність спеціалізованого програмного модуля MCO 305 для підйомних механізмів; вбудований гальмівний транзистор і алгоритм Hoist Mode з функцією утримання вантажу; найкраще співвідношення «характеристики / вартість» для умов даного проекту; широке сервісне представництво в Україні і наявність запасних частин; підтримка протоколів Modbus RTU і PROFIBUS DP для інтеграції в АСУТП.

2.10 Технічні характеристики обраного ПЧ та схема підключення.

Розглянемо більш детально вибраний перетворювач. В табл. 2.6 наведені основні технічні характеристики перетворювача частоти.

Таблиця 2.6 – Повні характеристики Danfoss FC-102P18K5T4.

Параметр	Значення	Одиниця
Серія / тип	FC-102P18K5T4E55H4	—

Параметр	Значення	Одиниця
Номинальна потужність двигуна	18,5	кВт
Номинальний вихідний струм (режим N)	38	А
Максимальний вихідний струм (60 с)	57 (150%)	А
Максимальний вихідний струм (1 с)	68 (180%)	А
Вхідна напруга (3-фазна)	380–480	В (±10%)
Вхідна частота	50/60	Гц
Вихідна частота	0–590	Гц
Напруга DC-шини	~540	В
Алгоритм керування	Vector Control (VVC+)	—
Точність швидкості (sensorless)	±0,5	% від n_H
Гальмівний транзистор	Вбудований, $R_{br} \geq 25$ Ом	—
Час розгону / гальмування	0,01–3600	с (програм.)
Аналогові входи	$2 \times \pm 10$ В / 0–20 мА	—
Цифрові входи	6×24 В DC	—
Аналогові виходи	2×0 –20 мА	—
Реле виходи	3×240 В AC / 2 А	—
STO (Safe Torque Off)	SIL 2 / PLd (EN 13849-1)	—

Параметр	Значення	Одиниця
Протоколи зв'язку	Modbus RTU, PROFIBUS DP, CANopen (опц.)	—
Ступінь захисту	IP55 (виконання H4)	—
Клас ЕМС	C2 (EN 61800-3) з вбуд. фільтром	—
Температура навколишнього середовища	-10...+50	°C
Маса	~12	кг
Габарити (Ш×В×Г)	242×520×260	мм

Для розсіювання енергії при опусканні вантажу підключається зовнішній гальмівний резистор. Мінімальний опір гальмівного резистора для FC-102 (18,5 кВт):

$$R_{brmin} = \frac{U_{dc}^2}{2 \cdot P_{brmax}} \approx 6,6 \text{ Ом.} \quad (2.25)$$

Обирається резистор типу Danfoss MCE101C1000A100R00 (або аналог): $R = 25$ Ом, $P_{тривала} = 1$ кВт, $P_{пікова} = 10$ кВт (60 с). Для покриття пікового навантаження 11 кВт – паралельно підключаються два резистори по 50 Ом / 5 кВт кожен. Ефективний опір: 25 Ом, ефективна пікова потужність: 10 кВт.

Для зниження рівня вищих гармонік вхідного струму (THDi) і захисту від перенапруг у мережі встановлюється трифазний вхідний дросель. Рекомендований Danfoss для FC-102 / 18,5 кВт: дросель типу ANF 005 (5% від U_n): $L = 0,68$ мГн, $I_n = 38$ А. Встановлення дроселя знижує THDi з ~80% до ~30–35%.

На введенні живлення ПЧ встановлюється автоматичний вимикач типу Schneider Electric EZD160E або аналог: $I_n = 50$ А, тип розцеплювача C (для захисту

кабелю), $I_{kz} \geq 25$ кА. Перед ПЧ у лінію доцільно встановити запобіжники типу gR або aR (Ferraz-Shawmut або Bussmann) для захисту силових ключів IGBT від струмів короткого замикання (прискорене спрацювання ≤ 1 мс).

Схема підключення частотного перетворювача Danfoss FC-102 до двигуна AIP160S4 наведена на рисунку 2.1.

На схемі зображені основні елементи, такі як: клеми трифазного живлення 3×380 В, 50; вбудований керований випрямляч та інвертор; клеми підключення електроприводу; аналогові ді дискретні входи/виходи, а також інтерфейс зовнішньої комунікації RS-485.

Протокол Modbus RTU (клеми 68, 69) з'єднує ПЧ з промисловим контролером (ПЛК) системи АСУТП для дистанційного моніторингу швидкості, струму, теплового стану і передачі команд.

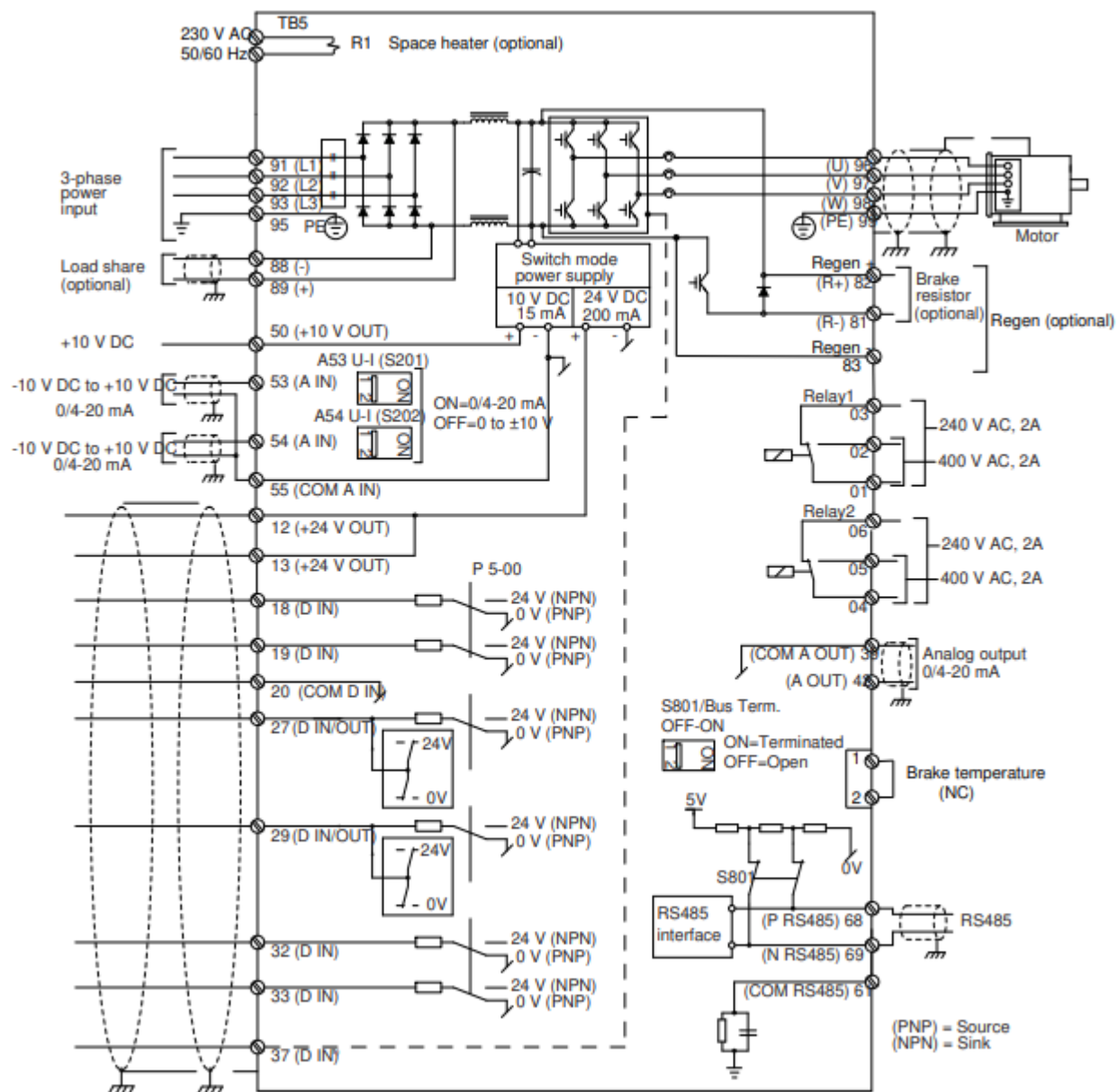


Рис. 2.1 – Типова схема підключень ПЧ Danfoss FC-102.

За результатами розрахунку і порівняльного аналізу для системи електроприводу вантажного підйомника вантажопідйомністю 2500 кг на базі двигуна AIP160S4 (15 кВт) обрано частотний перетворювач Danfoss FC-102P18K5T4 номінальною потужністю 18,5 кВт. Обраний ПЧ відповідає всім технічним вимогам: забезпечує векторне керування з повним моментом від нульової швидкості, функцію

Safe Torque Off рівня SIL 2 / PLd, спеціалізований режим Hoist Mode з алгоритмом Anti-gravity, вбудований гальмівний транзистор для підключення зовнішнього резистора і підтримку протоколів Modbus RTU та PROFIBUS DP для інтеграції в АСУТП. Схема підключення передбачає повноцінний захист за всіма рівнями: механічний (автоматичний вимикач), апаратний (STO через кнопку E-STOP і кінцевий вимикач), програмний (обмеження моменту і струму у ПЧ) та механічний (гальмо з контролером Anti-gravity).

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НА БАЗІ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

3.1 Фізичні припущення та вихідні рівняння.

Математична модель електричної машини визначається як фундаментом для проектування систем керування, аналізу динамічних режимів, перевірки алгоритмів захисту та оптимізації енергетичних характеристик приводу. Адекватна модель повинна відтворювати фізичні процеси у машині з достатньою для поставленої задачі точністю, залишаючись при цьому обчислювально прийнятною для реалізації у реальному часі або в середовищах числового моделювання.

Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (АД КЗ) визначається як нелінійним електромеханічним перетворювачем із взаємопов'язаними електромагнітними і механічними процесами. Повна модель у природній системі координат статора (abc) містить змінні коефіцієнти у диференціальних рівняннях, що залежать від кута повороту ротора. Це суттєво ускладнює аналіз і синтез систем керування. Перетворення Парка–Горєва забезпечує можливість перейти до системи координат, де коефіцієнти рівнянь не залежать від положення ротора, що відкриває можливість для ефективного застосування методів теорії лінійних і нелінійних систем автоматичного керування.

У цьому розділі послідовно виводяться рівняння АД КЗ у природній системі координат, здійснюється перехід до узагальненої двофазної системи ($\alpha\beta$), а потім — до довільної системи координат, що обертається (dq). Розглядаються найважливіші окремі випадки: система координат, орієнтована за вектором потокозчеплення ротора (Field-Oriented Control, FOC), а також пряме керування моментом (DTC). Наводиться повна система рівнянь стану у форматі, зручному для числового інтегрування і реалізації у середовищах MATLAB/Simulink.

Математична модель АД КЗ будується на основі рівнянь кола та законів електромагнітної індукції. Для отримання аналітично зручної моделі приймають ряд стандартних припущень, закріплених у нормативній базі стандарту ІЕС 60034-1:

Магнітна система не насичена – магнітна проникність заліза нескінченна і залізо не вносить втрат (втрати у сталі враховуються окремою гілкою намагнічування за необхідності). Обмотки рівномірно розподілені по колу статора і ротора – повітряний зазор однорідний. Вищі просторові гармоніки МРС нехтуються – враховується тільки перша (основна) гармоніка. Параметри обмоток (активні опори R , індуктивності L) не залежать від температури і частоти струму (лінійна модель). Ротор симетричний, ефект витіснення струму у стрижнях ротора нехтується.

При цих припущеннях трифазний АД описується системою диференціальних рівнянь Кірхгофа для ланцюгів обмоток статора і ротора, а також рівнянням руху ротора. Позначимо фазні струми статора i_{sA} , i_{sB} , i_{sC} і ротора i_{rA} , i_{rB} , i_{rC} ; фазні напруги статора u_{sA} , u_{sB} , u_{sC} (напруга ротора дорівнює нулю для КЗ обмотки); потокозчеплення статора Ψ_{sA} , Ψ_{sB} , Ψ_{sC} та ротора Ψ_{rA} , Ψ_{rB} , Ψ_{rC} .

Рівняння напруги для статора у матричній формі:

$$[u_s] = [R_s] \cdot [i_s] + d/dt [\Psi_s], \quad (3.1)$$

де $[R_s] = \text{diag}(R_s, R_s, R_s)$ – матриця активних опорів статора; $[u_s]$, $[i_s]$, $[\Psi_s]$ – вектори фазних напруг, струмів і потокозчеплень відповідно.

Рівняння напруги для ротора (КЗ – зовнішня напруга нуль):

$$[0] = [R_r] \cdot [i_r] + d/dt [\Psi_r], \quad (3.2)$$

де $[R_r] = \text{diag}(R_r, R_r, R_r)$ – матриця активних опорів ротора, зведена до числа витків статора.

Рівняння потокозчеплень внаслідок матрицю індуктивностей:

$$\begin{aligned} [\Psi_s] [L_{ss} L_{sr}(\theta)] [i_s] \\ [\Psi_r] = [L_{rs}(\theta) L_{rr}] \cdot [i_r], \end{aligned} \quad (3.3)$$

де L_{ss} – матриця власних і взаємних індуктивностей статора; L_{rr} – аналогічна матриця ротора; $L_{sr}(\theta)$ – матриця взаємних індуктивностей між статором і ротором, що залежить від кута повороту ротора θ . Саме ця залежність забезпечує вихідну систему рівнянь нелінійною зі змінними коефіцієнтами.

Матриця взаємних індуктивностей характеризується вигляд:

$$L_{sr}(\theta) = L_m \cdot \begin{vmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{vmatrix} \quad (3.4)$$

де L_m – максимальна взаємна індуктивність між фазою статора і фазою ротора при суміщенні їхніх осей. Елемент матриці у рядку k і стовпці m дорівнює

$$L_m \cdot \cos(\theta - (k-m) \cdot 2\pi/3) \quad (3.5)$$

що відображає кутове зміщення між фазами.

Рівняння руху ротора (другий закон Ньютона для обертання):

$$J \cdot d\omega_r/dt = M_{em} - M_c - B \cdot \omega_r, \quad (3.6)$$

де J – момент інерції ротора і приєднаних мас ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$); $\omega_r = p \cdot \Omega$ – механічна кутова швидкість, помножена на кількість пар полюсів p (тобто електрична кутова швидкість ротора); M_{em} – електромагнітний момент; M_c – момент опору навантаження; B – коефіцієнт в'язкого тертя.

Електромагнітний момент визначається як векторний добуток вектора потокозчеплення і вектора струму:

$$M_{em} = \frac{3\pi}{2} \cdot \frac{(\Psi_{sA} \cdot i_{sB} - \Psi_{sB} \cdot i_{sA} + \Psi_{sB} \cdot i_{sC} - \Psi_{sC} \cdot i_{sB} + \Psi_{sC} \cdot i_{sA} - \Psi_{sA} \cdot i_{sC})}{3} \quad (3.7)$$

або у компактній формі внаслідок взаємне індуктивне зв'язування між фазами, що залежить від θ . Наявність тригонометричних функцій θ у матриці L_{sr} забезпечує аналітичне та числове дослідження такої системи надзвичайно трудомістким. Для усунення цієї проблеми використовується перетворення координат.

3.2 Перетворення Парка–Горєва: фізична сутність і математичне формулювання.

Перетворення, яке в англійській літературі називається «перетворенням Парка» (Park's transformation), а в українській – «перетворенням Парка–Горєва», було незалежно запропоновано американським інженером Робертом Парком у 1929 році і радянським вченим Горєвим приблизно в той самий час. Суть перетворення полягає в переході від трифазної нерухомої системи координат (abc) до двофазної системи, що обертається з довільною кутовою швидкістю ω_k . При правильному виборі ω_k матриця взаємних індуктивностей L_{sr} стає константою, що радикально спрощує аналіз.

Перший крок: трифазна $\rightarrow$ двофазна нерухома система ($\alpha\beta 0$)

Першим кроком визначається як перетворення трьох фазних змінних (abc) у дві ортогональні нерухомі компоненти (α, β) і одну нульову (0). Це перетворення Кларка (Clarke transformation), яке визначається як частковим випадком Парка–Горєва при $\omega_k = 0$.

Матриця прямого перетворення Кларка (амплітудно-інваріантна форма):

$$T_{\alpha\beta 0} = \frac{2}{3} \cdot \begin{vmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{vmatrix} \quad (3.8)$$

Тобто:

$$\begin{aligned} x_{\alpha} &= \frac{2}{3} \cdot (x_A - x_B/2 - x_C/2) \\ x_{\beta} &= \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot (x_B - x_C) \\ x_0 &= \frac{1}{3} \cdot (x_A + x_B + x_C) \end{aligned} \quad (3.9)$$

де x може означати напругу, струм або поточозчеплення. Коефіцієнт $2/3$ обраний з умови амплітудної інваріантності: амплітуда x_{α} дорівнює амплітуді фазної змінної x_A при симетричній трифазній системі. Альтернативно застосовують потужнісно-інваріантну форму з коефіцієнтом $\sqrt{2/3}$, за якої миттєва потужність у трифазній і двофазній системах збігається.

При симетричній трифазній системі ($x_A + x_B + x_C = 0$) нульова компонента $x_0 = 0$, і система зводиться до двох рівнянь ($\alpha\beta$). Зворотне перетворення:

$$\begin{aligned} x_A &= x_{\alpha} \\ x_B &= -x_{\alpha}/2 + \sqrt{3}/2 \cdot x_{\beta} \\ x_C &= -x_{\alpha}/2 - \sqrt{3}/2 \cdot x_{\beta} \end{aligned} \quad (3.10)$$

У системі координат $\alpha\beta$ рівняння АД КЗ набувають вигляду, де матриця індуктивностей вже не залежить від θ механічно, але внаслідок взаємодію потоків ротора і статора ще містить обертову ЕРС (члени з ω_r). Проте рівняння суттєво спрощуються: замість шести фазних рівнянь маємо чотири (два для α і два для β), а структура – блочно-симетрична.

Другий крок: нерухома $\alpha\beta \rightarrow$ система координат, що обертається (dq)

Другий крок – обертання осей $\alpha\beta$ з кутовою швидкістю ω_k на кут

$$\theta_k = \int \omega_k dt \quad (3.11)$$

Матриця цього повороту:

$$T_{dq} = \begin{vmatrix} \cos \theta_k & \sin \theta_k \\ -\sin \theta_k & \cos \theta_k \end{vmatrix} \quad (3.12)$$

Компоненти у системі dq:

$$\begin{aligned} x_d &= x_\alpha \cdot \cos \theta_k + x_\beta \sin \theta_k \\ x_q &= -x_\alpha \sin \theta_k + x_\beta \cos \theta_k \end{aligned} \quad (3.14)$$

Повне перетворення Парка-Горєва від abc до dq (з нульовою компонентою):

$$T_{Park}(\theta_k) = \frac{2}{3} \cdot \begin{vmatrix} \cos \theta_k & \cos(\theta_k - 2\pi/3) & \cos(\theta_k + 2\pi/3) \\ -\sin \theta_k & -\sin(\theta_k - 2\pi/3) & -\sin(\theta_k + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{vmatrix} \quad (3.14)$$

Зворотнє перетворення (матриця T_{Park}^{-1}):

$$T_{Park}^{-1}(\theta_k) = \begin{vmatrix} \cos \theta_k & -\sin \theta_k & 1 \\ \cos(\theta_k - 2\pi/3) & -\sin(\theta_k - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta_k + 2\pi/3) & -\sin(\theta_k + 2\pi/3) & 1 \end{vmatrix} \quad (3.15)$$

Ключова властивість перетворення: при будь-якому виборі ω_k матриця взаємних індуктивностей статор–ротор у системі dq стає діагональною константою. Фізично це

означає, що у системі координат dq взаємна індуктивність між обмотками статора по осі d і обмотками ротора по осі d постійна (дорівнює L_m), і так само по осі q, а перехресні зв'язки d-q для взаємної індуктивності відсутні. Платою за це визначається як поява у рівняннях «обертових ЕРС» — доданків виду $\omega_k \cdot \Psi_q$ і $\omega_k \cdot \Psi_d$, що відображають обертання системи координат.

3.3 Рівняння АД КЗ у довільній системі координат dq.

Після застосування перетворення Парка-Горєва система рівнянь АД КЗ у довільній системі координат dq (без нульових компонент при симетричному навантаженні) набуває такого вигляду.

Рівняння напруги статора:

$$\begin{aligned} u_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega_k \Psi_{sq} \\ u_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\Psi_{sq}}{dt} + \omega_k \Psi_{sd} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Рівняння напруги ротора (КЗ – напруга дорівнює нулю):

$$\begin{aligned} 0 &= R_r i_{rd} + \frac{d\Psi_{rd}}{dt} - (\omega_k - \omega_r) \Psi_{rq} \\ 0 &= R_r i_{rq} + \frac{d\Psi_{rq}}{dt} + (\omega_k - \omega_r) \Psi_{rd} \end{aligned} \quad (3.17)$$

де $\omega_r = p \cdot \Omega$ – електрична кутова швидкість ротора (рад/с); $(\omega_k - \omega_r) = \omega_{sl}$ – кутова швидкість ковзання системи координат відносно ротора.

Рівняння потокозчеплень:

$$\begin{aligned} \Psi_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \Psi_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \Psi_{rd} &= L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \Psi_{rq} &= L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{aligned} \quad (3.18)$$

де $L_s = L_{ls} + L_m$ – повна індуктивність статора (L_{ls} – індуктивність розсіювання статора); $L_r = L_{lr} + L_m$ – повна індуктивність ротора (L_{lr} – індуктивність розсіювання ротора); L_m – взаємна (намагнічувальна) індуктивність.

Електромагнітний момент у системі dq:

$$M_{em} = \frac{3}{2}p(\Psi_{sd}i_{sq} - \Psi_{sq}i_{sd}) \quad (3.19)$$

або еквівалентно внаслідок потокозчеплення ротора:

$$M_{em} = \frac{3}{2}p \frac{L_m}{L_r} (\Psi_{rd}i_{sq} - \Psi_{rq}i_{sd}) \quad (3.20)$$

Рівняння руху:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = p(M_{em} - M_c) - B\omega_r \quad (3.21)$$

3.4 Числова реалізація моделі.

Система звичайних диференціальних рівнянь, отримана у розділі 3.5, інтегрується чисельно з обраним кроком дискретизації h . Вибір кроку визначається найшвидшою часовою константою у системі – для АД КЗ це, як правило, $\sigma \cdot \tau_r$ (постійна часу ланцюга розсіювання). Для стабільності явних методів (Runge–Kutta) крок повинен бути у 5–10 разів меншим за $\sigma \cdot \tau_r$.

Точність математичної моделі визначається точністю параметрів R_s , R_r , L_s , L_r , L_m , J . Ці параметри можна отримати з каталогу виробника (для стаціонарного режиму), експериментально (дослідження ХХ і КЗ) або за допомогою алгоритмів ідентифікації у реальному часі.

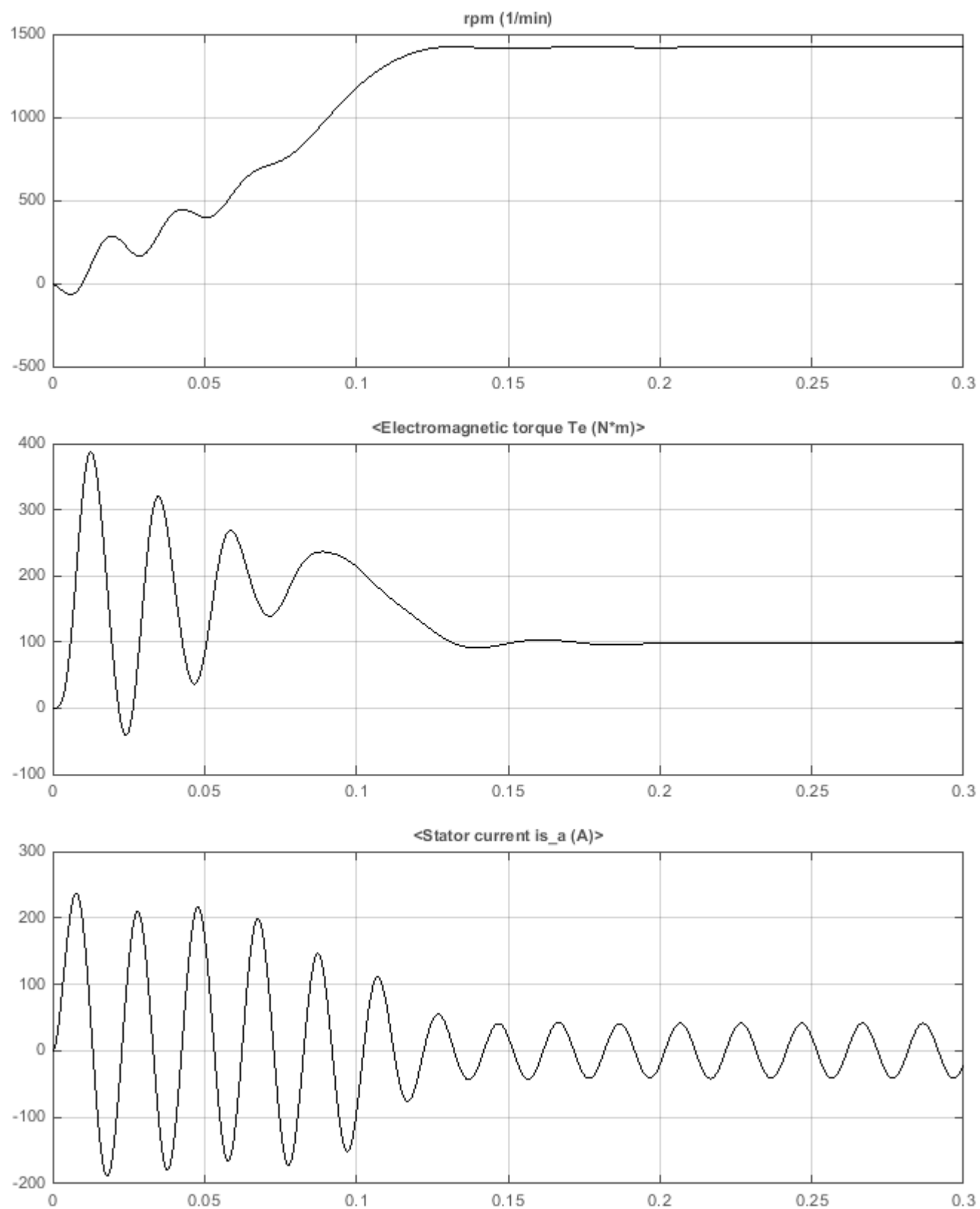


Рис. 3.2 – Результати моделювання прямого пуску в середовищі Simulink.

The diagram illustrates a MATLAB/Simulink model of a Three-Phase Asynchronous Machine. The main components and their interconnections are as follows:

- Power Source:** A three-phase voltage source is represented by three AC voltage sources (Vab, Vbc, and Vca) connected in a star configuration. The phase sequence is indicated by the subscripts.
- Machine Model:** The machine is represented by a block labeled "AIP160S4". It has three input terminals (A, B, C) and a mechanical output terminal (m). The mechanical output is connected to a "Demux" block.
- Control and Monitoring:**
 - The mechanical output (m) is connected to a "Look-Up Table" block, which provides the rotor speed (wm) to a "Math Function" block.
 - The "Math Function" block calculates the electromagnetic torque (Te) using the formula: $T_e = \frac{1}{1980} \cdot \sin(\frac{2\pi}{3} \cdot \text{wm})$.
 - The torque (Te) is then converted to a mechanical speed (rpm) using a gain block (K).
 - The mechanical speed (rpm) is fed back to the "Look-Up Table" block.
 - The mechanical speed (rpm) is also fed back to the "Math Function" block.
 - The mechanical speed (rpm) is also fed back to the "Math Function" block.
 - The mechanical speed (rpm) is also fed back to the "Math Function" block.
- Scope:** The mechanical speed (rpm) and the electromagnetic torque (Te) are connected to a "Scope" block for monitoring.
- Continuous Ideal Switch:** A block labeled "Continuous Ideal Switch" is connected to the mechanical output (m) of the machine.

Схема моделі ПЧ, попри свою спрощеність, суттєво відрізняється від схеми прямого пуску. На ній присутнє вже керовані джерела змінного струму, керування яких відбувається за алгоритмом наближеним до $V/f=\text{const}$. Це дає змогу оцінити різницю між двома режимами пуску електродвигуна.

КРБ.АТЕiРС.1.641-03.3.9

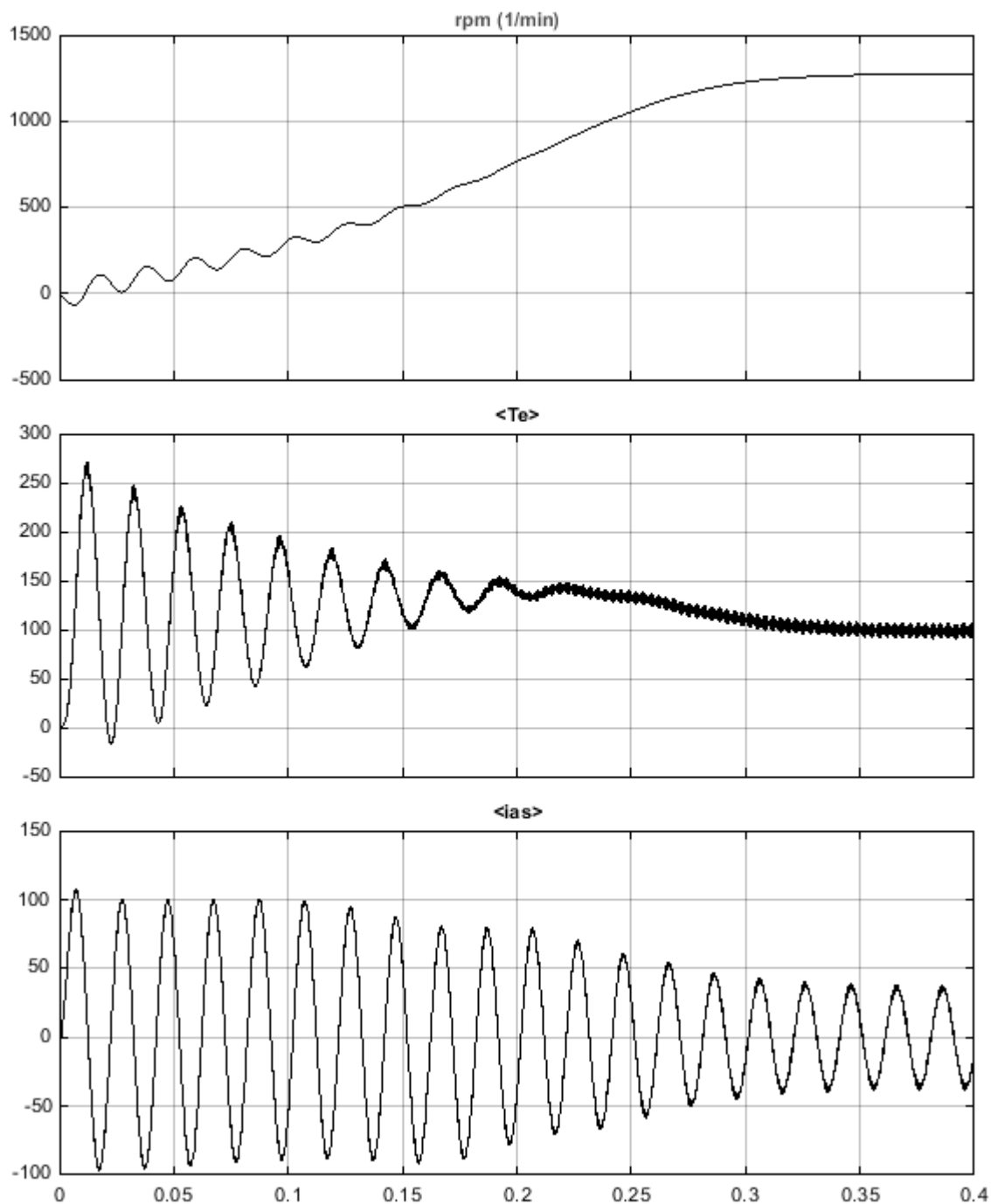


Рис. 3.4 – Результати моделювання включення електродвигуна з використанням ПЧ в середовищі Simulink.

3.5 Аналіз пускових характеристик на основі математичної моделі.

Математична модель у просторі станів забезпечує можливість відтворювати перехідні процеси при пуску, зміні навантаження, реверсі та гальмуванні. Для аналізу пускових характеристик початкові умови: $i_{sd}(0) = 0$, $i_{sq}(0) = 0$, $\Psi_{rd}(0) = 0$, $\Psi_{rq}(0) = 0$, $\omega_r(0) = 0$. На вхід подається номінальна напруга u_s (або профіль напруги/частоти при пуску ПЧ).

При прямому пуску (стрибоподібна подача U_H) у перші моменти ($t \approx 0\text{--}50$ мс) ковзання $s = 1$, потокозчеплення ротора ще не встановилося, і струм визначається переважно індуктивністю розсіювання:

$$I_{\text{пуск}} \approx U_H / (\omega_s \cdot \sigma \cdot L_s) = U_H / (X_{sc}),$$

де X_{sc} – реактивний опір короткого замикання. Пусковий момент у перші миті менший за номінальний (потік ще не наростив), а пік струму складає 7,5 від I_H . Протягом 0,15 с (залежно від J і навантаження) двигун розганяється, потік наростає до номінального, швидкість наближається до синхронної.

На рис. 3.2, на графіку струму i_{sa} видно характерний пусковий струм, який сягає 230А.

При керованому пуску внаслідок використання ПЧ модель показує, що при правильно налаштованому $V/f = \text{const}$ потокозчеплення ротора підтримується на рівні $\approx \Psi_H$ протягом усього розгону, а струм не перевищує 2,2 від I_H , що можна пояснити недосконалістю моделі. В реальних умовах, при використанні ПЧ, пусковий струм зазвичай не перевищує 1,35 від I_H .

За результатами моделювання можна зробити висновок, що застосування ПЧ сприяє більш економічному режиму роботи електродвигуна в момент пуску, що в свою чергу впливає на зниження навантаження на електромережу та зменшення рівня реактивних перешкод.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВАНТАЖНОГО ПІДЙОМНИКА ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Модернізація електроприводу вантажного підйомника шляхом заміни класичної схеми прямого включення або схеми зірка–трикутник на систему «частотний перетворювач + асинхронний двигун з короткозамкненим ротором» визначається як капітальними витратами, які потребують економічного обґрунтування. Рішення про доцільність модернізації приймається на підставі порівняльного аналізу поточних витрат базового варіанта (без ПЧ) і проектного варіанта (з ПЧ) з урахуванням одноразових капітальних витрат на придбання і монтаж обладнання та визначення терміну окупності інвестицій.

В основу розрахунків покладено такі вихідні дані: підйомник вантажопідйомністю 5 тонн; встановлена потужність електродвигуна $P_n = 15$ кВт; номінальна напруга 380 В; номінальна швидкість підйому $v = 0,5$ м/с; режим роботи повторно-короткочасний S3, ПВ = 40%; кількість робочих днів на рік $N_d = 260$; двозмінний режим роботи (2×8 год = 16 год на добу); тариф на електроенергію $C_e = 7,5$ грн/кВт·год; базовий варіант — пуск схемою зірка–трикутник (Y– Δ) без регулювання швидкості; проектний варіант — частотний перетворювач із векторним керуванням, рекуперативний модуль для режиму опускання вантажу.

4.1 Аналіз базового варіанта електроприводу.

Характеристика базової схеми включення.

Базовий варіант електроприводу підйомника передбачає пряме або пуск за схемою Y– Δ асинхронного двигуна потужністю 15 кВт від мережі 380 В / 50 Гц. Схема Y– Δ забезпечує зниження пускового струму до 1,7–2,3 I_n (проти 5–7 I_n при прямому пуску), однак не забезпечує можливість регулювати швидкість у робочому режимі. Двигун протягом всього часу роботи споживає потужність, близьку до номінальної,

незалежно від реального завантаження. Відсутність рекуперації при опусканні вантажу призводить до розсіювання потенційної енергії вантажу на механічному гальмі.

Споживана з мережі активна потужність двигуна у номінальному режимі:

$$P_{сп} = P_n / (\eta_{дв} \cdot \cos \varphi_n) = 15000 / (0,91 \cdot 0,87) \approx 18\,950 \text{ Вт} \approx 18,95 \text{ кВт},$$

де $\eta_{дв} = 0,91$ – ККД двигуна при номінальному навантаженні; $\cos \varphi_n = 0,87$ – номінальний коефіцієнт потужності. Однак у режимі S3 з ПВ = 40% двигун протягом 40% часу циклу знаходиться під навантаженням (підйом), а 60% - у паузі (підготовка до наступного підйому, строповка, переміщення без навантаження). У базовому варіанті при холостому ході двигун відключається, але пуск із зупиненого стану кожного разу потребує додаткової реактивної енергії і спричиняє ударне навантаження на механіку.

Розрахунок річного споживання електроенергії базовим варіантом.

Визначимо фонд робочого часу підйомника за рік. Кількість робочих годин на рік:

$$T_{рік} = N_d \cdot t_{зм} = 260 \cdot 16 = 4160 \text{ год/рік}.$$

З урахуванням режиму S3, ПВ = 40%, ефективний час роботи під навантаженням (підйом):

$$T_{нав} = T_{рік} \cdot ПВ / 100 = 4\,160 \cdot 0,40 = 1\,664 \text{ год/рік}.$$

Число циклів підйом-опускання на рік. Приймаємо тривалість одного повного циклу $t_{ц} = 3 \text{ хв}$ (30 с підйом, 30 с опускання, 120 с строповка, переміщення, очікування). Кількість циклів за рік:

$$n_{ц} = T_{рік} \cdot 60 / t_{ц} = 4160 \cdot 60 / 3 = 83\,200 \text{ циклів/рік.}$$

Розрахунок споживання електроенергії у базовому варіанті виконується за такою методикою. При підйомі вантажу двигун споживає потужність, близьку до номінальної (з урахуванням середнього завантаження $\beta = 0,7$ від номінального, оскільки не кожен підйом виконується з повним вантажем):

$$P_{підйом} = \beta \cdot P_{сп} = 0,70 \cdot 18,95 \approx 13,27 \text{ кВт.}$$

При опусканні вантажу у базовому варіанті двигун відключений, енергія вантажу розсіюється на гальмі. Потужність не споживається, але і не рекуперується. Витрати електроенергії на підйом за рік:

$$W_{підйомб} = P_{підйом} \cdot T_{нав} = 13,27 \cdot 1664 \approx 22081 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік.}$$

Додаткові витрати на пускові режими. При кожному пуску $Y-\Delta$ споживається додаткова реактивна енергія, яка переходить у теплоту в обмотках. Еквівалентна додаткова активна витрата на один пуск оцінюється з рівняння теплового балансу:

$$\Delta W_{пуск} = I_{пуск}^2 \cdot R_c \cdot t_{пуск} / 1000 \approx (2,0 \cdot I_n)^2 \cdot R_e \cdot 4 / 1000,$$

де $t_{пуск} \approx 4 \text{ с}$ — час розгону при $Y-\Delta$ пуску; R_e — еквівалентний активний опір фазного кола. Для спрощення приймаємо, що кожен пуск еквівалентний додатковому споживанню $0,015 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ (типова оцінка для двигуна 15 кВт з $Y-\Delta$ пуском за результатами вимірювань). За рік:

$$\Delta W_{пустиб} = n_{ц} \cdot 0,015 = 83\,200 \cdot 0,015 = 1248 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік.}$$

Загальне річне споживання електроенергії базовим варіантом:

$$W_6 = W_{\text{підйомб}} + \Delta W_{\text{пускиб}} = 22081 + 1248 = 23329 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

Річні витрати на електроенергію у базовому варіанті:

$$З_{\text{еб}} = W_6 \cdot C_{\text{е}} = 23329 \cdot 7,50 = 174\,968 \text{ грн/рік} \approx 175\,000 \text{ грн/рік}.$$

Витрати на технічне обслуговування базового варіанта.

Базова схема $Y-\Delta$ включає: три силових контактори (пускач), теплове реле, таймер і допоміжну апаратуру. Ресурс контакторів при 83200 пусканнях на рік і комутаційному ресурсі 500 000 операцій складає 6 років. Щорічні витрати на обслуговування базової апаратури включають: заміну контактів контакторів (раз на 2 роки, вартість комплекту ≈ 1800 грн): 900 грн/рік; заміна теплових реле і таймерів (раз на 5 років, вартість ≈ 2500 грн): 500 грн/рік; заробітна плата обслуговуючого електрика (20 год/рік, ставка 120 грн/год): 2400 грн/рік. Додатково: ремонт механічного гальма (інтенсивний знос внаслідок часте гальмування без рекуперації) – 2 рази на рік, вартість одного ремонту 3500 грн: 7000 грн/рік. Разом річні витрати на ТО у базовому варіанті:

$$З_{\text{ТОб}} = 900 + 500 + 2\,400 + 7\,000 = 10\,800 \text{ грн/рік}.$$

Витрати на ремонт редуктора внаслідок ударних пускових навантажень. При $Y-\Delta$ пуску динамічний момент при перемиканні $Y \rightarrow \Delta$ досягає 3–4 Мн, що спричиняє підвищений знос зубчастих передач. Міжремонтний інтервал редуктора у базовому варіанті – 3 роки, середня вартість ремонту 18000 грн, тобто:

$$З_{\text{ремредб}} = 18000 / 3 = 6000 \text{ грн/рік}.$$

Загальні річні витрати на обслуговування і ремонти у базовому варіанті:

$$Зобслб = ЗТОб + Зремредб = 10800 + 6000 = 16800 \text{ грн/рік.}$$

Таким чином, загальні щорічні витрати по базовому варіанту складають $Зб \approx 191\,000$ грн/рік.

4.2 Аналіз проектного варіанта – впровадження частотного перетворювача.

Технічна характеристика проектного варіанта.

Проектний варіант передбачає встановлення частотного перетворювача з векторним керуванням і рекуперативним модулем типу Danfoss FC103 (або аналог ABB ACS880-01-033A-3 або Siemens SINAMICS G120) номінальною потужністю 18,5 кВт (наступний стандартний типорозмір вище 15 кВт для забезпечення запасу за перевантажувальною здатністю 125% при пуску). Частотний перетворювач забезпечує: плавний розгін двигуна від 0 до номінальних обертів за налаштований час (Трозг = 5 с); регулювання швидкості підйому в діапазоні 1:50 – від повзучої (2% v_n) для точного позиціонування до номінальної; повзуча швидкість при підході до крайнього положення – 0,01 м/с, що підвищує точність зупинки до ± 5 мм; рекуперацію потенційної енергії вантажу при опусканні у мережу внаслідок активний фронтальний перетворювач (AFE). ККД ПЧ $\eta_{ПЧ} = 0,975$.

Розрахунок споживання електроенергії проектним варіантом.

Споживана потужність при підйомі з урахуванням ПЧ:

$$P_{\text{підйомп}} = \beta \cdot P_n / (\eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{ПЧ}}) = 0,70 \cdot 15000 / (0,91 \cdot 0,975) \approx 11870 \text{ Вт} \approx 11,87 \text{ кВт.}$$

Порівняно з базовим варіантом (13,27 кВт) споживана потужність при підйомі знизилася на 1,40 кВт. Це обумовлено двома чинниками: по-перше, ПЧ з алгоритмом оптимізації потоку знижує намагнічувальний струм при частковому навантаженні, зменшуючи втрати в міді і сталі двигуна; по-друге, усунення реактивних пікових

струмів при пуску (1,0–1,3 Ін замість 2,0–2,3 Ін при Y–Δ) знижує реактивну складову і підвищує $\cos \varphi$ системи.

Відновлена енергія при рекуперації (опускання вантажу). При опусканні вантажу маси $Q = 5$ т зі швидкістю $v = 0,5$ м/с рекуперативна потужність:

$$P_{рек} = Q \cdot g \cdot v \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{ПЧ} = 5000 \cdot 9,81 \cdot 0,5 \cdot 0,88 \cdot 0,97 \approx 20980 \text{ Вт} \approx 20,98 \text{ кВт.}$$

де $\eta_{мех} = 0,88$ – ККД механічної передачі (редуктор + барабан). Час опускання за цикл приймаємо рівним часу підйому $t_{оп} = t_{підйом} = 30$ с. Загальний час опускання за рік:

$$T_{оп} = n_{ц} \cdot t_{оп} / 3600 = 83\,200 \cdot 30 / 3600 = 693 \text{ год/рік.}$$

Повернена у мережу енергія за рік (з урахуванням середнього завантаження $\beta = 0,70$):

$$W_{рек} = \beta \cdot P_{рек} \cdot T_{оп} = 0,70 \cdot 20,98 \cdot 693 \approx 10165 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік.}$$

Час підйому за рік (= час навантаження $T_{нав}$):

$$T_{підйом} = n_{ц} \cdot t_{підйом} / 3600 = 83\,200 \cdot 30 / 3600 = 693 \text{ год/рік.}$$

Річне споживання електроенергії при підйомі у проектному варіанті:

$$W_{підйомп} = P_{підйомп} \cdot T_{підйом} = 11,87 \cdot 693 \approx 8225 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік.}$$

У базовому варіанті відновленої енергії при опусканні немає. У проектному варіанті чисте споживання з урахуванням рекуперації:

$$W_{\text{пнетто}} = W_{\text{підйомп}} - W_{\text{рек}} = 8\,225 - 10\,165 = -1940 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

Від'ємне значення означає, що теоретично при повному завантаженні підйомника з рекуперацією система повертає у мережу більше енергії при опусканні, ніж споживає при підйомі. Однак на практиці середній коефіцієнт завантаження при опусканні нижчий (не кожен цикл – опускання з повним вантажем), тому введемо реалістичний коефіцієнт завантаження при опусканні $\beta_{\text{оп}} = 0,55$. Тоді:

$$W_{\text{рекреал}} = \beta_{\text{оп}} \cdot P_{\text{рек}} \cdot T_{\text{оп}} = 0,55 \cdot 20,98 \cdot 693 \approx 7\,986 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

$$W_{\text{пнетто}} = W_{\text{підйомп}} - W_{\text{рекреал}} = 8\,225 - 7\,986 = 239 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

Таким чином, проектний варіант споживає з мережі лише 239 кВт·год/рік нетто, тоді як базовий – 10444 кВт·год/рік. Економія електроенергії на рік:

$$\Delta W = W_{\text{буточн}} - W_{\text{пнетто}} = 10444 - 239 = 10205 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}.$$

Економія коштів на електроенергії на рік:

$$\Delta Z_e = \Delta W \cdot C_e = 10205 \cdot 7,50 = 76538 \text{ грн/рік} \approx 76500 \text{ грн/рік}.$$

Економія витрат на технічне обслуговування

Впровадження частотного перетворювача суттєво змінює структуру витрат на технічне обслуговування. Аналіз проводиться за трьома статтями: апаратура керування, механічне гальмо і редуктор.

Апаратура керування. У проектному варіанті замість трьох контакторів Y–Δ залишається один вихідний контактор (байпас) і сам ПЧ. Кількість комутацій силових

контакторів зменшується у 50–100 разів (ПЧ здійснює пуск без удару по контактору). Річні витрати на ТО апаратури у проектному варіанті: фільтри вентиляторів ПЧ (очищення 2 рази/рік, 30 хв, ставка 120 грн/год): 120 грн/рік; профілактичний огляд ПЧ електриком (4 год/рік $\times$ 120 грн/год): 480 грн/рік; разом: 600 грн/рік (проти 3800 грн/рік у базовому). Економія по апаратурі: 3 200 грн/рік.

Механічне гальмо. Плавний пуск і гальмування внаслідок використання ПЧ з алгоритмом «Anti-gravity» (утримання моменту до відпускання гальма) усувають ударне навантаження на гальмо. Рекуперативне гальмування внаслідок ПЧ виконує основну частку гальмування, механічне гальмо спрацьовує лише при аварійній зупинці. Міжремонтний інтервал гальма збільшується з 6 місяців до 3 років. Витрати на ремонт гальма у проектному варіанті: 3 500 грн / 3 роки = 1 167 грн/рік (проти 7000 грн/рік у базовому). Економія по гальму: 5833 грн/рік.

Редуктор. Відсутність ударних пускових моментів (пусковий момент ПЧ $\leq 1,3$ Мн проти 3-4 Мн при Y- Δ) збільшує міжремонтний інтервал редуктора з 3 до 8 років. Витрати на ремонт редуктора у проектному варіанті: 18000 грн / 8 років = 2250 грн/рік (проти 6000 грн/рік у базовому). Економія по редуктору: 3750 грн/рік.

Загальна річна економія на технічному обслуговуванні:

$$\Delta \text{ЗТО} = 3\,200 + 5\,833 + 3\,750 = 12\,783 \text{ грн/рік} \approx 12800 \text{ грн/рік.}$$

Додаткові економічні ефекти.

Окрім прямої економії на електроенергії і ТО, впровадження ПЧ дає ряд додаткових економічних ефектів, що піддаються кількісній оцінці.

Зниження реактивної складової споживання. У базовому варіанті $\cos \varphi$ системи при пуску і частковому навантаженні знижується до 0,6-0,7, що призводить до штрафних санкцій за споживання реактивної потужності понад ліміт (відповідно до Постанови НКРЕКП про порядок застосування двоставкового тарифу). ПЧ підтримує $\cos \varphi \geq 0,95$ на вході (при застосуванні вхідного LC-фільтра або AFE), що усуває

штрафи. Орієнтовна економія на реактивній складовій: 4500 грн/рік (за даними типових підприємств з аналогічними умовами).

Зниження простоїв внаслідок зниження ймовірності аварій. Ударні пускові навантаження у базовому варіанті визначається як причиною незапланованих зупинок внаслідок поломку редуктора, обрив каната або спрацювання захистів. Середня кількість позапланових зупинок у базовому варіанті – 4 на рік, тривалість кожної – 6 год. Втрати виробництва внаслідок простоїв (за оцінкою підприємства – 500 грн/год недовиробленої продукції або послуги з вантажоперевезень): $4 \cdot 6 \cdot 500 = 12000$ грн/рік. У проектному варіанті кількість позапланових зупинок знижується до 1 на рік: економія становить: $3 \cdot 6 \cdot 500 = 9000$ грн/рік.

Загальна сума додаткових економічних ефектів:

$$\Delta Z_{\text{дод}} = 4500 + 9000 = 13500 \text{ грн/рік.}$$

Таким чином, сукупна річна економія від впровадження ПЧ складає $\Delta Z_{\text{річ}} \approx 102820$ грн/рік.

4.3 Визначення капітальних витрат на модернізацію.

Капітальні витрати на модернізацію електроприводу включають вартість придбання обладнання, монтажних і пусконаладжувальних робіт, а також витрати на навчання персоналу. Кошторис складено відповідно до методики, рекомендованої ДСТУ Б Д.1.1-1:2013 «Правила визначення вартості будівництва» у частині обладнання і монтажних робіт.

Таблиця 4.1 – Кошторис капітальних витрат на модернізацію електроприводу підйомника.

№	Найменування	К-сть	Ціна, грн	Сума, грн
1	ЧП Danfoss FC103 (18,5 кВт, рекуп. AFE)	1 шт	62 000	62 000

№	Найменування	К-сть	Ціна, грн	Сума, грн
2	Вхідний дросель (LC-фільтр гармонік)	1 шт	4 800	4 800
3	Вихідний фільтр dU/dt (захист ізоляції двигуна)	1 шт	3 600	3 600
4	Гальмівний резистор (резервний, при відмові AFE)	1 шт	2 200	2 200
5	Шафа керування (IP54, з монтажною панеллю)	1 шт	8 500	8 500
6	Кабель силовий 4×16 мм ² (від мережі до ЧП, 15 м)	15 м	180	2 700
7	Кабель моторний екранований 4×10 мм ² (15 м)	15 м	220	3 300
8	Кабель керування екранований 10×0,75 мм ² (20 м)	20 м	65	1 300
9	Автоматичний вимикач QF1 (40 А, 3-фазний)	1 шт	1 800	1 800
10	Контактор байпасний KM1 (40 А)	1 шт	1 200	1 200
11	Кнопковий пост управління (3 кнопки + аварійна)	1 шт	1 500	1 500
12	Енкодер інкрементальний (для зворотного зв'язку швидкості)	1 шт	3 800	3 800
13	Заземлювальна шина РЕ, з'єднувачі, кабельні наконечники	комплект	1 200	1 200
14	Монтажні і пусконаладжувальні роботи (40 людино-год × 180 грн)	40 л/год	180	7 200
15	Навчання оператора і електрика (виїзд спеціаліста)	1 раз	4 500	4 500
16	Непередбачені витрати (5% від суми п.1–13)			4 795

Загальна сума капітальних витрат становить: К = 114395 грн.

4.4 Розрахунок терміну окупності та показників ефективності.

Простий термін окупності.

Простий (недисконтований) термін окупності визначається як відношення капітальних витрат до річної економії:

$$\text{Ток} = K / \Delta Z_{\text{річ}} = 114\,400 / 102\,820 \approx 1,11 \text{ року} \approx 13,3 \text{ місяця.}$$

Таким чином, при тарифі 7,5 грн/кВт·год і повному завантаженні підйомника капітальні витрати на модернізацію окупляться протягом 13–14 місяців, що визначається як відмінний показник для промислових інвестицій (зазвичай прийнятним вважається термін до 5 років).

Дисконтований термін окупності (NPV-аналіз)

Для більш коректної оцінки з урахуванням вартості грошей у часі проводиться розрахунок чистої приведеної вартості (Net Present Value, NPV) і дисконтованого терміну окупності (Discounted Payback Period, DPP). Ставка дисконтування приймається рівною $r = 20\%$ річних (відповідає середньозваженій вартості капіталу для промислових підприємств України у 2024–2025 рр. з урахуванням інфляційного ризику).

Дисконтований грошовий потік за рік n :

$$CF_n = \Delta Z_{\text{річ}} / (1 + r)^n$$

Розрахунок за роками наведений у таблиці 4.2. Проект вважається окупленим у рік n , коли накопичена сума дисконтованих грошових потоків перевищує початкові капіталовкладення K .

Таблиця 4.2 — Розрахунок дисконтованого терміну окупності ($r = 20\%/рік$)

Рік (n)	ΔЗріч, грн	Коефіцієнт (1+r) ⁿ	CF _n (дискон.), грн	Накоп. CF, грн	Не окупнено, грн
0 (інвестиція)	-114 400	1,000	-114 400	-114 400	114 400
1	102 820	1,200	85 683	-28 717	28 717
2	102 820	1,440	71 403	+42 686	0 (окупн.)
3	102 820	1,728	59 502	+102 188	—
4	102 820	2,074	49 585	+151 773	—
5	102 820	2,488	41 321	+193 094	—

Дисконтований термін окупності знаходиться між 1-м і 2-м роком. Уточнений розрахунок: у кінці 1-го року залишок непокритих витрат складає 28 717 грн; дисконтований грошовий потік у 2-му році — 71 403 грн. Дрובה частина 2-го року, необхідна для покриття залишку:

$$DPP = 1 + 28\,717 / 71\,403 \approx 1 + 0,402 \approx 1,40 \text{ року} \approx 17 \text{ місяців.}$$

Таким чином, дисконтований термін окупності при ставці дисконтування 20% складає приблизно 17 місяців, що також є гарним показником, у порівнянні з загально прийнятими 5 роками.

Можна зробити висновок, що впровадження частотного перетворювача визначається економічно доцільним заходом з видатними інвестиційними показниками, що додатково підкріплюється якісними ефектами: підвищенням безпеки праці, точності позиціонування, збільшенням міжремонтного ресурсу обладнання і відповідністю вимогам законодавства у сфері енергетичної ефективності.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ МОНТАЖІ І ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ПІДЙОМНИКІВ

Вантажні підйомники належать до об'єктів підвищеної небезпеки та перебувають під особливим контролем держави у сфері охорони праці. Відповідно до статті 21 Закону України «Про охорону праці» (№ 2694-ХІІ від 14.10.1992 р. зі змінами), роботодавець зобов'язаний забезпечити безпечні умови праці при обслуговуванні, монтажі та ремонті вантажопідйомних машин. Порушення вимог безпеки при експлуатації підйомників визначається як однією з найбільш поширених причин виробничого травматизму: за статистикою Фонду соціального страхування України, вантажопідйомне обладнання причетне до 12–18% усіх смертельних нещасних випадків на виробництві. Саме тому питання охорони праці при монтажі та експлуатації вантажних підйомників мають першорядне значення і регламентуються розгалуженою системою нормативно-правових актів.

У цьому розділі систематизовано вимоги охорони праці та техніки безпеки, визначено перелік чинних нормативних документів, розглянуто організаційні та технічні заходи безпеки при монтажних роботах, порядок технічного огляду і обслуговування, вимоги до персоналу, а також заходи у надзвичайних ситуаціях.

5.1 Нормативно-правова база у сфері безпеки вантажопідйомних механізмів.

Правове регулювання безпечної експлуатації та монтажу вантажних підйомників в Україні здійснюється на кількох рівнях: законодавчому, нормативному (підзаконні акти, НПАОП, ДСТУ) та локальному (інструкції підприємств). Ієрархія нормативних документів відповідає принципу від загального до конкретного: закони України; постанови Кабінету Міністрів; накази міністерств; нормативно-правові акти з охорони праці; стандарти ДСТУ.

Основоположними законодавчими актами визначається як: Закон України «Про охорону праці» (№ 2694-XII від 14.10.1992 р.) визначає загальні засади державної політики у сфері охорони праці, права і обов'язки працівників та роботодавців, систему управління охороною праці; Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування» (№ 1105-XIV від 23.09.1999 р.) регулює страхування від нещасних випадків і профзахворювань; Кодекс законів про працю України (КЗпП) встановлює загальні трудові гарантії; Закон України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» (№ 124-VIII від 15.01.2015 р.) запроваджує вимоги технічних регламентів ЄС до підйомного обладнання.

Ключовим спеціальним нормативним документом визначається як НПАОП 0.00-1.01-18 «Правила будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів», затверджений наказом Міністерства соціальної політики України від 19.01.2018 р. № 62. Цей документ замінив попередній НПАОП 0.00-1.01-07 і поширюється на всі типи вантажопідіймних машин — мостові, козлові, баштові і стрілові крани, електричні талі, вантажні підйомники з вантажопідйомністю від 0,1 т. Правила встановлюють вимоги до конструкції, технічного огляду, реєстрації, обслуговування і ремонту вантажопідйомного обладнання.

Окремим нормативним документом визначається як НПАОП 45.2-1.01-98 «Правила безпеки при будівництві та монтажі», що регламентує проведення монтажних робіт, у тому числі установку вантажопідйомного обладнання. Для будівельних підйомників окремо діє НПАОП 45.2-7.02-12 «Правила безпечної експлуатації будівельних підйомників». Електрична безпека при підключенні і обслуговуванні електрообладнання підйомників визначається НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

Окрему групу складають стандарти серії ДСТУ EN, гармонізовані з європейськими стандартами EN, що визначаються обов'язковими при постачанні обладнання на ринок ЄС і рекомендованими при проектуванні в Україні. Зокрема, ДСТУ EN 528:2010 поширюється на стелажні штабелери з вертикальними напрямними, ДСТУ EN 1570-1:2016 на підйомні столи. Технічний регламент «Про

машини» (Постанова КМУ № 257 від 30.01.2013 р., гармонізований з Директивою ЄС 2006/42/ЕС) встановлює обов'язкові суттєві вимоги безпеки для всього механічного обладнання, що вводиться в обіг в Україні, включаючи вантажні підйомники.

5.2 Організаційні заходи безпеки та управління охороною праці.

Відповідно до статті 13 Закону України «Про охорону праці», роботодавець зобов'язаний розробити і впровадити систему управління охороною праці (СУОП), що охоплює організаційні, технічні, санітарно-гігієнічні та соціально-економічні заходи. Для підприємств, що експлуатують вантажні підйомники, СУОП обов'язково включає такі організаційні елементи.

Відповідно до пункту 2.1 НПАОП 0.00-1.01-18, роботодавець зобов'язаний призначити наказом по підприємству осіб, відповідальних за: утримання вантажопідйомних машин у справному стані (інженерно-технічний працівник з відповідною кваліфікацією); безпечне проведення робіт з переміщення вантажів (керівник виробничого підрозділу). Відповідальна за утримання особа повинна мати вищу технічну освіту або технічну освіту за спеціальністю, пов'язаною з вантажопідйомними машинами, і пройти перевірку знань нормативних актів з охорони праці у порядку, встановленому НПАОП 0.00-4.12-05. Перевірка знань проводиться комісіями підприємства або навчальних закладів не рідше одного разу на три роки, а при переведенні на нову посаду – позачергово.

Відповідно до розділу 10 НПАОП 0.00-1.01-18, вантажні підйомники підлягають реєстрації в територіальних органах Держпраці України до введення в експлуатацію. Реєстрація не вимагається для підйомників вантажопідйомністю до 1 т, а також для підйомників у вибухонебезпечних середовищах (вони реєструються в окремому порядку). Для реєстрації власник подає паспорт машини (технічну документацію виробника), акт технічного огляду, відомості про місце установки. Органи Держпраці присвоюють підйомнику реєстраційний номер і роблять запис у паспорті. Після реєстрації підйомнику дозволяється введення в експлуатацію. На

кожний підйомник ведеться журнал технічного обслуговування і ремонтів із записами всіх проведених робіт, дат і підписів відповідальних осіб.

Кінцева безпека вантажного підйомника визначається не лише конструкцією, але й рівнем підготовки обслуговуючого персоналу. Відповідно до НПАОП 0.00-4.12-05 і розділу 4 НПАОП 0.00-1.01-18, до управління і обслуговування вантажних підйомників допускаються особи, які: досягли 18-річного віку; пройшли медичний огляд відповідно до наказу МОЗ України № 246 від 21.05.2007 р. і не мають протипоказань за станом здоров'я; пройшли навчання за відповідною програмою у навчальному закладі або безпосередньо на підприємстві; склали іспит перед кваліфікаційною комісією і отримали посвідчення машиніста (оператора) підйомника. Повторна перевірка знань проводиться не рідше одного разу на 12 місяців, а також при переведенні на нове місце роботи, після нещасного випадку або порушення вимог безпеки.

Стропальники (особи, що здійснюють зачіпку та обв'язку вантажів) теж підлягають спеціальній підготовці: навчання за програмою стропальника, перевірка знань та присвоєння кваліфікаційного розряду. Стропальники повинні знати схеми стропування типових вантажів, маси вантажів, граничні навантаження стропів та правила безпечної роботи у зоні дії підйомника. Перед початком роботи стропальник зобов'язаний перевірити стан стропів, гаків і траверс і відмовитися від роботи при наявності дефектів.

Система інструктажів з охорони праці для персоналу, що обслуговує вантажні підйомники, включає відповідно до НПАОП 0.00-4.12-05 такі види: вступний інструктаж (при прийомі на роботу, проводить спеціаліст з охорони праці); первинний інструктаж на робочому місці (перед початком роботи, проводить безпосередній керівник); повторний інструктаж (не рідше 1 разу на 3 місяці для робіт з підвищеною небезпекою, до яких відноситься обслуговування підйомників); позаплановий інструктаж (при зміні умов праці, після нещасного випадку, при порушенні вимог безпеки); цільовий інструктаж (при виконанні разових робіт, що не входять до

посадових обов'язків — наприклад, при монтажі або ремонті). Кожен інструктаж реєструється у журналі інструктажів з підписами інструктора і працівника.

5.3 Технічні вимоги безпеки до конструкції підйомників.

Технічні вимоги безпеки до конструкції вантажних підйомників визначаються одночасно кількома нормативними документами: НПАОП 0.00-1.01-18, ДСТУ EN 280:2019, Технічним регламентом «Про машини» (Постанова КМУ № 257 від 30.01.2013 р.) та стандартами серії ДСТУ ISO 4301. Усі ці вимоги об'єднуються у кількох ключових аспектах.

Розрахунок несучих металоконструкцій вантажного підйомника виконується відповідно до ДСТУ EN 13001-2:2014 «Крани - загальні принципи проектування - навантаження». Розрахунок ведеться на граничні стани несучої здатності (Ultimate Limit State) і втоми (Fatigue Limit State). Коефіцієнти запасу міцності для несучих елементів: не менше 1,5 за статичним навантаженням і не менше 1,1 за динамічним. Зварні шви підлягають розрахунку на зріз і відрив; категорія зварних з'єднань визначається відповідно до ДСТУ EN 1993-1-9:2012 (Єврокод 3).

Відповідно до розділу 3 НПАОП 0.00-1.01-18, металоконструкції підйомників повинні мати захисне покриття від корозії (фарбування, цинкування або інший спосіб) відповідно до умов експлуатації (температура, вологість, наявність агресивних середовищ). Товщина захисного покриття контролюється у процесі технічного огляду. Тріщини, значні деформації, корозійне ушкодження несучих елементів визначається як безумовними підставами для виведення підйомника з експлуатації до проведення ремонту і позачергового технічного огляду.

Сталеві канати і ланцюги підйомників вибираються з коефіцієнтом запасу міцності не менше $k = 5,6$ для групи режиму M1–M4 і $k = 7,1$ для M5–M8 відповідно до ДСТУ ISO 4301-1:2014. Критерії бракування канатів визначаються відповідно до ДСТУ ISO 4309:2011 «Крани, канати - догляд, технічне обслуговування, огляд і бракування»: наявність обривів дротів (більше допустимої кількості на довжині, кратній $6d$ або $30d$ каната), зниження діаметра каната більше ніж на 10% від

номінального, поверхнева і внутрішня корозія, деформації (кошик, спіральність, вузли). Ланцюги підлягають браковці при подовженні ланки більше ніж на 3% від номінального розміру і зношуванні ланки більше ніж на 10% по діаметру прутка.

Гальмівна система визначається як найбільш відповідальним елементом безпеки. Відповідно до пункту 3.14 НПАОП 0.00-1.01-18, гальмо підйомника повинне відповідати таким вимогам: нормально замкнений принцип дії (гальмо замкнене при відсутності живлення); гальмівний момент перевищує статичний момент від підвішеного вантажу не менше ніж у 1,5 рази (для підйомників М1–М4) або 1,75 рази (для М5–М8); час спрацювання гальма — не більше 0,8 с; рівномірне притиснення гальмівних колодок або дисків. Електромагнітні гальма перевіряються на час спрацювання і гальмівний момент не рідше одного разу на 12 місяців.

НПАОП 0.00-1.01-18 (розділ 3.17) вимагає наявності таких пристроїв безпеки на вантажних підйомниках: кінцевий вимикач верхнього положення гака спрацьовує не пізніше ніж за 50 мм до жорсткого упору і відключає механізм підйому; кінцевий вимикач нижнього положення забезпечує збереження не менше 1,5 витків каната на барабані; обмежник вантажопідйомності спрацьовує при перевищенні номінальної вантажопідйомності на 10% і блокує підйом (для підйомників М3 і вище обов'язковий); обмежник перекосу (для мостових кранів і рейкових підйомників) запобігає сходу з рейок при нерівномірному навантаженні ходових коліс. Справність кінцевих вимикачів перевіряється оператором щоденно перед початком роботи шляхом контрольного наїзду на упор без вантажу. Несправний кінцевий вимикач визначається як підставою для негайного зупинення підйомника.

Відповідно до ДСТУ ГОСТ 12.2.003:2006 «Устаткування виробниче, загальні вимоги безпеки» та НПАОП 0.00-1.01-18, рухомі механічні частини підйомника (редуктор, барабан, ланцюг, зубчасті передачі) повинні бути огорожені захисними кожухами, що виключають доступ обслуговуючого персоналу до них під час роботи. Огородження повинні бути жорсткими, витримувати зусилля не менше 300 Н, і не знижувати ефективності охолодження. Зняття огорожень допускається тільки при відключеному і заблокованому живленні.

Захист від враження електричним струмом забезпечується відповідно до НПАОП 40.1-1.21-98 і ДСТУ EN 60204-32:2009 «Безпека машин, електрообладнання машин, вимоги до підйомних машин». Корпуси електродвигунів, шаф керування, рейки і металоконструкції підйомника підлягають захисному заземленню, з опором заземлювального пристрою не більше 4 Ом для мереж із ізольованою нейтраллю і не більше 10 Ом для TN-систем. Проводка захисного заземлення виконується мідним проводом перетином не менше половини перетину фазного провідника.

5.4 Вимоги безпеки при монтажі вантажних підйомників.

Монтаж вантажного підйомника визначається як роботою підвищеної небезпеки, що вимагає розроблення і затвердження проекту виконання робіт (ПВР) і наряду-допуску відповідно до НПАОП 45.2-1.01-98 і НПАОП 0.00-1.01-18 (розділ 11). ПВР затверджується головним інженером організації, що виконує монтаж, і погоджується з власником об'єкта.

До початку монтажних робіт необхідно виконати такий перелік підготовчих заходів. По-перше, провести огляд майданчика монтажу: перевірити несучу здатність підлоги (фундаменту) відповідно до паспортних даних підйомника, питомий тиск на опорну поверхню не повинен перевищувати допустимого навантаження на підлогу; при необхідності виконати посилення фундаменту або влаштувати окремий фундамент за проектом, розробленим і погодженим у встановленому порядку. По-друге, визначити і позначити небезпечну зону монтажу огороженням заввишки не менше 1,2 м з попереджувальними знаками відповідно до ДСТУ ISO 7010:2014 «Графічні символи, реєстровані символи безпеки». Ширина небезпечної зони при роботі на висоті повинна бути не менша ніж 7 м від периметру монтажного майданчика.

По-третє, перевірити наявність і справність підйомно-транспортного обладнання, що буде використовуватися при монтажі (кран, домкрати, стропи) і переконатися в наявності на них дійсних технічних паспортів і дат наступного технічного огляду. Всі такелажні пристосування перед використанням повинні бути

оглянуті і після огляду відзначені крейдою або бирками. По-четверте, перевірити наявність засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) для всіх учасників монтажу: захисна каска (ДСТУ EN 397:2014), захисне взуття зі сталевим підноском (ДСТУ EN ISO 20345:2014), рукавиці (ДСТУ EN 388:2016), захисний пояс або страхувальна система при роботі на висоті більше 1,3 м (ДСТУ EN 363:2011 «Засоби індивідуального захисту від падіння з висоти, системи зупинення падіння»).

Стропування вузлів і блоків підйомника при монтажі виконується відповідно до схем стропування, наведених у ПВР або технічній документації виробника. Забороняється виконувати стропування вузлів за елементи конструкції, не призначені для підйому (ручки, кришки, патрубки), а також за вали і осі без спеціальних захватів. Маса кожного елемента, що піднімається, повинна бути визначена і не перевищувати номінальну вантажопідйомність крана або підйомного пристрою з урахуванням коефіцієнта умов роботи.

Стропи підбираються з урахуванням кількості гілок, кута між гілками (не більше 90° у стандартних умовах) і маси вантажу відповідно до ДСТУ ГОСТ 25573:2016 «Стропи вантажні канатні для будівництва». При куті між гілками α сила у кожній гілці збільшується пропорційно $1/\cos(\alpha/2)$, тому при $\alpha = 60^\circ$ натяг у кожній гілці на 15% перевищує значення для вертикального стропа, при $\alpha = 90^\circ$ — на 41%. Забороняється наближатися до піднятого вантажу і знаходитися під ним. Сигнали машиністу крана подає тільки один призначений сигнальник (стропальник) відповідно до ДСТУ ГОСТ 12.3.009:2012; при поганій видимості або чутності між кількома ланками використовується передача сигналів по ланцюгу внаслідок додаткових сигнальників.

Роботи на висоті при монтажі підйомників регламентуються НПАОП 0.00-1.15-07 «Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті». Роботи на висоті понад 1,3 м виконуються тільки за нарядом-допуском і з обов'язковим застосуванням засобів захисту від падіння. Використання страхувальних поясів (без страхувального пристрою, що обмежує вільне падіння) допускається тільки у виняткових випадках, передбачених ПВР, у загальному випадку застосовуються системи зупинення падіння

(ДСТУ EN 363:2011), що включають страхувальний пристрій (самоблокувальний або з поглиначем енергії), страхувальну мотузку або мотузковий стропер і анкерний пристрій. Анкерний пристрій повинен витримувати зусилля не менше 10 кН за ДСТУ EN 795:2012.

Ліси і підмостки, що використовуються при монтажі, повинні бути розраховані і зведені відповідно до ДБН А.3.2-2:2009 «Охорона праці і промислова безпека у будівництві», мати поручні заввишки не менше 1 м і бічні борти заввишки не менше 0,15 м. Навантаження на настил лісів не повинне перевищувати розрахункового; неприпустимо розміщення на підмостках важких деталей без перевірки їхньої маси.

Електромонтажні роботи при підключенні вантажного підйомника до мережі виконуються відповідно до НПАОП 40.1-1.21-98 і ПУЕ (Правила устаткування електроустановок). До виконання цих робіт допускаються особи, що мають групу з електробезпеки не нижче III (для напруги до 1000 В). Роботи виконуються після повного знеструмлення лінії живлення і встановлення заземлень, попереджувальних плакатів («Не вмикати! Працюють люди») і замків на комутаційній апаратурі відповідно до вимог процедури LOTO (Lockout/Tagout) або аналогічної вітчизняної процедури, регламентованої НПАОП 40.1-1.21-98 розділ 4.

Перед подачею напруги після завершення електромонтажних робіт обов'язково проводяться вимірювання: опір ізоляції кабелів і обмоток двигуна (не менше 0,5 МОм при 500 В мегаомметром відповідно до ДСТУ ГОСТ Р 50462:2013); опір заземлювального контуру; правильність чергування фаз (за допомогою покажчика чергування фаз). Результати вимірювань вносяться в протокол електровипробувань, що визначається як обов'язковим документом для введення підйомника в експлуатацію.

5.5 Технічний огляд та порядок введення в експлуатацію.

Порядок технічного огляду вантажних підйомників визначається розділом 10 НПАОП 0.00-1.01-18. Технічний огляд визначається як основним способом перевірки відповідності підйомника вимогам безпеки і поділяється на первинний (після

виготовлення або монтажу), черговий (плановий) і позачерговий (після ремонту, реконструкції, нещасного випадку).

Первинний технічний огляд проводиться підприємством — власником підйомника (або спеціалізованою організацією, що характеризується відповідний дозвіл Держпраці) перед введенням підйомника в експлуатацію. Він включає: огляд металоконструкцій, зварних швів, вузлів кріплення; перевірку комплектності технічної документації (паспорт, настанова з експлуатації, схема електрична, протоколи випробувань); статичне навантаження — підйом вантажу масою 125% від номінальної вантажопідйомності на висоту 100–200 мм на 10 хвилин; перевірку відсутності деформацій і розкриття зварних швів після статичного навантаження; динамічне навантаження — виконання повного циклу підйому, переміщення і опускання вантажем 110% від номінального, з перевіркою гальма (при відключенні двигуна вантаж не повинен просідати більше ніж на 50 мм).

Черговий частковий огляд виконується не рідше одного разу на 12 місяців відповідальною особою підприємства і включає огляд усіх елементів підйомника, перевірку мастила, стану гальм, справності кінцевих вимикачів і приладів безпеки. Результати часткового огляду вносяться в журнал технічного обслуговування. Черговий повний огляд зі статичним і динамічним навантаженнями проводиться не рідше одного разу на три роки. Для підйомників, що працюють в умовах підвищеної інтенсивності (режим М6–М8) або агресивного середовища, проміжок між плановими оглядами може бути скорочений за рішенням власника або вимогою органів Держпраці.

Позачерговий технічний огляд визначається як обов'язковим: після проведення ремонту несучих металоконструкцій або механізмів; після реконструкції підйомника; після встановлення підйомника на нове місце; після аварії або нещасного випадку; при наявності приписів органів Держпраці. За результатами позачергового огляду складається акт, до якого додаються протоколи вимірювань і розрахунки (за наявності). Підйомник отримує дозвіл на подальшу експлуатацію лише після усунення всіх виявлених невідповідностей.

5.6 Вимоги безпеки при експлуатації вантажних підйомників.

Відповідно до розділу 5 НПАОП 0.00-1.01-18, оператор вантажного підйомника зобов'язаний перед початком кожної зміни провести огляд і перевірку підйомника у такому порядку. Перевірка механічної частини: огляд несучих металоконструкцій на наявність тріщин, деформацій, ослаблених болтових з'єднань; огляд канату (ланцюга) на предмет обривів дротів, корозії, перегинів і деформацій; перевірка стану гальма, наявності зазору між колодками і шківом у розгальмованому стані (не менше 0,5 мм), відсутності замаслення; перевірка кріплення гака (гайка шплінтована, запобіжний замок гака справний); перевірка рівня мастила у редукторі. Перевірка електричної частини та приладів безпеки: справність кнопкового поста (кнопки повертаються у вихідне положення після відпускання); справність кінцевих вимикачів (при підйомі гака без вантажу до крайнього верхнього положення, підйом повинен зупинитися); справність аварійного вимикача (кнопка «СТОП») перевіряється натисканням під час холостого ходу. Усі виявлені несправності записуються у вахтовий журнал; при наявності несправностей, що впливають на безпеку, підйомник не вводиться в роботу до їх усунення.

Зона роботи вантажного підйомника повинна бути позначена і, по можливості, відокремлена від зон перебування інших працівників відповідно до ДСТУ ГОСТ 12.3.009:2012. Розміри небезпечної зони встановлюються у технологічній карті переміщення вантажів і залежать від габаритів вантажу і траєкторії переміщення. Під час підйому і переміщення вантажу забороняється: знаходження людей у зоні можливого падіння вантажу; переміщення вантажу над робочими місцями або проходами; підйом вантажу, маса якого перевищує номінальну вантажопідйомність; підйом примерзлого, засипаного або придавленого вантажу; підйом вантажу при ненатягнутому канаті (запобіжний захід від стрибка каната при знятті навантаження).

При роботі підйомника у зоні обмеженої видимості обов'язково призначається стропальник-сигнальник, що знаходиться у полі зору оператора і вантажу одночасно. Переміщення вантажу забороняється при силі вітру вище 15 м/с для відкритих

установок, а також при грозі, ожеледі або інших погодних умовах, що погіршують безпеку роботи — відповідно до пункту 5.11 НПАОП 0.00-1.01-18.

Усі вантажозахватні пристосування (стропи, ланцюги, кліщі, траверси, магніти) повинні мати паспорт або сертифікат відповідності і бути зареєстровані у журналі обліку вантажозахватних пристосувань. Кожне пристосування маркується: вказується номер, вантажопідйомність і дата наступного огляду. Огляд вантажозахватних пристосувань проводиться відповідальною особою не рідше одного разу на 10 днів відповідно до пункту 9.4 НПАОП 0.00-1.01-18.

5.7 Електробезпека при обслуговуванні підйомників.

Електробезпека при обслуговуванні вантажних підйомників з електроприводом регламентується НПАОП 40.1-1.21-98, ДСТУ EN 60204-32:2009 і відповідними розділами НПАОП 0.00-1.01-18. Вантажні підйомники відносяться до електроустановок напругою до 1000 В, а їхнє обслуговування - до робіт з підвищеною небезпекою.

Основні вимоги електробезпеки при обслуговуванні підйомників: усі роботи з електричною частиною підйомника виконуються тільки при відключеному живленні і встановлених заземленнях; двері і кришки електрошаф і шаф з частотними перетворювачами повинні бути зачинені і мати замки або пломби; при необхідності перевірки напруги під напругою використовуються діелектричні рукавиці (клас 00 або 0 відповідно до ДСТУ EN 60903:2006), діелектричні килимки або підставки; роботи в небезпечних приміщеннях (вологість >75%, температура >35°C, провідна підлога) виконуються з особливими запобіжними заходами відповідно до розділу 3 НПАОП 40.1-1.21-98. Перевірка ізоляції проводиться мегаомметром на 500 В або 1000 В з обов'язковим відключенням чутливої електроніки (ПЧ, ПЛК) перед вимірюванням. Опір ізоляції кожного кола щодо корпусу і між колами повинен бути не менше 0,5 МОм для силових кіл і не менше 1 МОм для кіл керування.

5.8 Пожежна безпека при монтажі та експлуатації підйомників.

Пожежна безпека при монтажі і експлуатації вантажних підйомників визначається ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва та споруд», ДСТУ 3675:2018 «Пожежна безпека - вимоги та методи контролю», а також Правилами пожежної безпеки в Україні (НАПБ А.01.001-2014).

У зоні монтажних робіт забороняється: виконання зварювальних робіт без попереднього очищення зони від горючих матеріалів у радіусі не менше 5 м і отримання дозволу на проведення вогневих робіт (наряд-допуск на вогневі роботи відповідно до НАПБ Б.02.014-2012); зберігання мастил і гідравлічних рідин поблизу нагрітих поверхонь (температура займання мінеральних мастил — 160–200°C); використання відкритого вогню для підігрівання гідравлічних рідин або мастил. Приміщення, де встановлені підйомники, обладнуються автоматичною пожежною сигналізацією і засобами первинного пожежогасіння (порошкові або вуглекислотні вогнегасники типу ВП-5 або ВВК-5) відповідно до норм ДСТУ 3855:1999.

Частотні перетворювачі і шафи керування визначається як пожежонебезпечним обладнанням у разі пошкодження ізоляції або перегріву. Тому необхідно: забезпечити вільний простір навколо шаф ПЧ не менше 0,5 м з усіх боків для природної вентиляції; не допускати засмічення вентиляційних решіток; щоквартально перевіряти і очищати від пилу внутрішні поверхні шаф стиснутим повітрям (тиск не більше 3 бар); використовувати тільки кабелі з перетинами, відповідними розрахунковим навантаженням, без скруток і ненадійних з'єднань.

5.9 Санітарно-гігієнічні вимоги та умови праці операторів підйомників.

Санітарно-гігієнічні умови праці операторів вантажних підйомників визначаються Державними санітарними нормами виробничого шуму, вібрації та інфразвуку (ДСН 3.3.6.037-99), Державними санітарними нормами та правилами при роботі з джерелами електромагнітних полів (ДСН 3.3.6.096-2002) та ДСТУ EN ISO 9241-5:2016 «Ергономіка взаємодії людина-система».

Шум. Рівень звукового тиску на робочому місці оператора підйомника не повинен перевищувати 80 дБА відповідно до ДСН 3.3.6.037-99. Основними джерелами шуму визначається як редуктор, гальмо і вентилятор охолодження двигуна. При рівні шуму понад 80 дБА роботодавець зобов'язаний забезпечити оператора ЗІЗ органів слуху (беруші або навушники, ДСТУ EN 352:2010) і провести атестацію робочого місця за умовами праці. Вібрація. Вібрація на рукоятках кнопочного поста і педалях не повинна перевищувати норм ДСН 3.3.6.039-99 «Державні санітарні норми виробничої локальної вібрації». Мікроклімат. Кабіни (пульти) управління підйомниками у закритих приміщеннях повинні відповідати ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень»: температура +18...+22°C у теплий сезон, +17...+21°C у холодний; відносна вологість 40–60%; швидкість руху повітря не більше 0,2 м/с.

Освітлення. Рівень освітленості зони роботи підйомника і майданчиків обслуговування регламентується ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення»: для загальної зони роботи — не менше 200 лк, для місць стропування і контролю вантажу - не менше 300 лк, для роботи у темний час доби або при поганій природній освітленості - переносне освітлення з напругою не більше 36 В (у особливо небезпечних приміщеннях - 12 В). Електромагнітні поля. Частотні перетворювачі генерують електромагнітне поле; для захисту оператора від ЕМП шафа ПЧ повинна бути закрита металевим корпусом (клас захисту IP20 і вище), а відстань від шафи ПЧ до постійного робочого місця оператора — не менше 1 м.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовані основні види підйомників, а також сформулювати основні вимоги до електроприводу, системи автоматичного керування обраного виду підйомника.
2. Був проведений розрахунок тягових зусиль електроприводу, а також розрахунок потужності електродвигуна. Завдяки цьому здійснили вибір двигуна необхідної потужності. Було обрано асинхронний двигун серії AIP 160 S4 та визначені його основні параметри. Це дало змогу обрати перетворювач частоти необхідної потужності та струму Danfoss FC-102P18K5T4 потужністю 18,5 кВт.
3. Розроблена математична модель непрямого векторного керування АД. Розраховано параметри схеми заміщення обраного асинхронного двигуна серії AIP 160 S4 .
4. Проведені розрахунки, необхідні для дослідження динамічних та статичних режимів електромеханічної системи шляхом моделювання.
5. Отримані висновки свідчать про високі показники якості розробленого електроприводу і його відповідність характеристикам, які були поставлені в проекті. Термін окупності 13 місяців.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII (зі змінами та доповненнями). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12> (дата звернення: 18.06.2026).
2. Про енергетичну ефективність : Закон України від 21.09.2021 № 1818-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20> (дата звернення: 18.06.2026).
3. Правила будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів : НПАОП 0.00-1.01-18 : затверджено наказом Міністерства соціальної політики України від 19.01.2018 № 62. Київ, 2018. 116 с.
4. ДСТУ ISO 4301-1:2014. Крани та вантажопідіймальне устаткування. Класифікація. Частина 1. Загальні положення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 16 с.
5. ДСТУ EN 13001-2:2014. Крани. Загальні принципи проектування. Частина 2. Навантаження. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 54 с.
6. ДСТУ ГОСТ 28330:2010. Машини електричні обертові. Двигуни асинхронні потужністю від 0,12 до 400 кВт включно. Загальні технічні умови. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 32 с.
7. Чорний О. П., Луговой А. В., Родькін Д. Й., Сисюк Г. Ю., Садовой О. В. Моделирование электромеханических систем : підручник. Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2001. 376 с.
8. Лавріненко Ю. М., Марченко О. С., Савченко П. І., Синявський О. Ю., Войтюк Д. Г., Лисенко В. П. Електропривод : підручник / за ред. Ю. М. Лавріненка. Київ : Ліра-К, 2009. 504 с.
9. Закладний О. М., Праховник А. В., Соловей О. І. Енергозбереження засобами промислового електропривода : навчальний посібник. Київ : Кондор, 2005. 408 с.
10. Сенько В. І., Трубіцин К. В., Чибеліс В. І. Інвертори і перетворювачі частоти : монографія. Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. 300 с.
11. Bose B. K. Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 738 p.

12. Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D., Pekarek S. D. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. 3rd ed. Hoboken : Wiley-IEEE Press, 2013. 672 p.

13. Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. 3rd ed. New York : John Wiley & Sons, 2003. 802 p.

14. Електродвигуни AIP 160 : каталог технічних характеристик [Електронний ресурс] / ТОВ «СЛЕМЗ» (Слобожанський електромашинобудівний завод). URL: <https://slemz.com.ua/elektrodivguni/zagalnopromyslovi/elektrodivgun-air-160s4-15kvt-1500obhv> (дата звернення: 18.06.2026).

15. VLT® HVAC Drive FC 102 : technical data [Електронний ресурс] / Danfoss A/S. URL: <https://www.danfoss.com/en/products/dds/low-voltage-drives/vlt-drives/vlt-hvac-drive-fc-102/> (дата звернення: 18.06.2026).